

平成 21 年 6 月 9 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19700663
 研究課題名 (和文) 科学の階層化にともなう電磁気学の方法・目的・理解の歴史的变化についての研究
 研究課題名 (英文) Historical Transition of the Methods, Objects and Understanding of Electromagnetism followed by Classification of the Sciences
 研究代表者
 夏目 賢一 (NATSUME KENICHI)
 金沢工業大学・基礎教育部・講師
 研究者番号：70449429

研究成果の概要：

18 世紀から 19 世紀にかけてのイギリス経験論では人間の感覚について研究が進められ、自然現象は力学的な性質に還元されると考えられた。そして、考察をもとに学問の分類がおこなわれた。本研究ではこのような歴史的な文脈を踏まえて、19 世紀イギリスの科学者ファラデーとトムソンを中心に、彼らが用いていた「力線」や「力学的モデル」といった概念が電磁気現象を研究し、それを理解していく上で持っていた歴史的意味を考察した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	0	1,900,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	210,000	2,810,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学社会学・科学技術史

キーワード：科学技術社会論、科学史、西洋史、イギリス

1. 研究開始当初の背景

よく知られているように、電磁気学はとくに 19 世紀のイギリスで大きな発展を遂げた。その中心的な存在であったのが、ファラデー、トムソン (ケルヴィン)、マクスウェルの 3 名の研究者たちである。ファラデーは、実験を主体とする研究方法によって、電気分解の法則や電磁誘導の発見をおこない、とくにその過程で「力線」や「場」といった概念を導入していった。そして、このファラデーの概念を数学的に解釈しながら体系的理論を構築していったのがトムソンやマクスウェル

である。

これらのイギリスでの研究動向について、デュエムはフランスとの研究方法の違いを比較しながら、イギリスでは「力学的モデル」を重視する傾向があったと指摘している。このように「力学的モデル」ないし「力線」やその流体との「アナロジー」を用いて電磁気学研究を進めていく方法は、これまでも繰り返して歴史研究のテーマとして取り上げられてきた。その結果、それぞれの研究者に即したそれらの特徴については、歴史的な資料から得られる範囲ではほぼ理解が得られたと考えられる。しかし、その一方で、これら

の方法が重視された傾向を当時の歴史的文脈に位置づけながら理解することは、オルソンがおこなったスコットランド哲学との関係についての議論など限られたものであり、科学史上の大きな課題であり続けている。

そこで、この研究では3名の研究者の中でも力学的モデルやアナロジーを自覚的に用いていたトムソンについて考察することにした。

トムソンは、「我々が物理学の特定の主題を理解しているかどうか」を試すことは「我々がその力学的モデルをつくることができるか」であるように思える」という発言を残していることに代表されるように、対象の理解と力学的モデルの構築とを結びつけて考えていた。これまで報告者は、科学における知識形成の過程をメタファーやアナロジーの観点から考察してきた経験があり、その研究の延長として、力学的モデルやアナロジーが、とくにトムソンを中心とする19世紀イギリスにおいてどのように研究の方法や目的ないし対象への理解そのものと関係していたのか、歴史的にさらに深い理解が可能であるように考えた。

2. 研究の目的

上記のような背景を踏まえ、主にトムソンの事例を研究対象とし、彼が研究で用いたモデルやアナロジーに着目することにより、自然科学の知識の「理解」のあり方と、19世紀イギリスにおける歴史的・制度的基盤との相関関係を分析することを目的とした。この研究は、科学の目的・方法の歴史的変化について調査研究をおこなうものであり、自然科学の知識についての「創造的な理解のあり方」を解明するための基礎的研究の一部となることが期待される。

現在の理科教育では、自然現象の原因となっている存在について問題関心を抱かせることが重要視されている。それも重要ではあるが、このような態度は、19世紀の文脈から考えると「科学的」というよりも「自然哲学的」である。このような「自然哲学的」問題関心を伸ばす教育は、科学に必要な問題関心の育成には十分とは言えない。科学とは、現象間の関係ないし法則性を記述するものであり、その原因が何であるかを必ずしも問うものではないからである。そのため、学年が上がるにつれて「理科離れ」とくに「物理学離れ」といった現象が生じるのではないかと。そういった問題を解決していくために重要なことは、「科学」の理解あり方を、事例に即してより具体的に分析していくことである。このように本研究は、歴史事例の研究を通じて、一般的な科学技術の認識論、ひいて

は教育の議論に対しても重要な意義を持つことが期待される。

3. 研究の方法

この研究で着目するトムソンは、電磁気学と熱力学の分野を中心に、19世紀イギリスで幅広く活躍した科学者である。彼は、大西洋横断ケーブルの敷設をはじめとする応用研究を進める一方で、ファラデーの電磁気学の理論を数学的に評価し、マクスウェルによる電磁気学の体系的理論構築へとつながる重要な基礎研究に着手して成果をあげた。また、彼の活躍したヴィクトリア時代は、産業への科学技術の応用が進むとともに、研究分野の専門分化が進んだ時代でもあった。ただし、19世紀における科学の専門分化は単なる「細分化」ではなく「階層化」をとまなうものであった。そして、この階層化は科学の「方法・目的・理解」の歴史的変化を反映してなされたものであった。

例えば、ヒューエルやマクスウェルの議論によると、科学の目的には「力学的因果関係の追及」「現象の法則の確立」「現象（対象）の分類」といった、方法に応じたさまざまなレベルがあり、それらは力学、熱学、電磁気学、そして化学といった各研究分野に対応していた。そして、この分類によると、電磁気学を研究する科学者の目的は、その現象の法則を見出すことであった。それに対して、「自然哲学者」の研究目的は、これら階層を横断し、研究で見出した現象の法則を、最終的には力学的な因果関係のモデルで説明することであった。そのため「科学者」であることに抵抗をおぼえ「自然哲学者」であることを自認していたファラデーやマクスウェルは、力線の実在性を想定し、電気の機械論的モデルへと考察を進めている。

このように、従来の自然哲学者は、現象を「理解」するためには力学的世界像の構築が目的となっていたのに対して、社会的に増えつつあった科学者は、現象の理解においてそのようなモデルの構築を必要としなかった。ファラデーを批判した19世紀の科学者スタージャンがそうであったように、「科学者」にとっては、力学的世界像や知覚を越えたモデルを構築することはあきらかな行き過ぎであり、意味のないものであった。しかしそうすると、「科学者」にとっての「理解の実感」の所在はどこにあったと言えるのだろうか。その現象の法則を数式などで論理的に記述し、それを理解できたとして、それが真の実感、あるいは満足をとまなうものだったのだろうか。そうした「理解の実感」の所在を分析ために、研究で用いられた「アナロジー」あるいは「物理モデル」を歴史的な文脈におい

て分析することが重要であると考えた。

以上のような問題関心を踏まえ、まずは下記のような5点の分析項目を設定した。

(1) 物理モデルの具体化

未知の自然現象を研究する際に想定されていたであろうモデル・イメージを具体的に同定する。例えば「電気」のモデルとして「流体」を考えている場合、その流体がどのような性質を持ち、実際の自然界にある流体とはどのように異なっているのかを明確化する。これはアナロジーの典型的な使用法でもあり、分析の基本となる。

(2) 複数モデルの相互作用の評価

一つの現象について、複数のモデルを用いながら研究を進めることがあり、このような態度が創造性に結びつくものではないかと考えている。例えば、電気力線を力学的な張力を持つ「線」でモデル化したり、空間を流れる「流体」の方向でモデル化したり、さまざまなモデルを駆使しながら研究を進める態度がこれにあたる。

また、複数の異なる自然現象について一つのモデルを用いることもある。例えば「熱」にも「電気」にも「流体」のモデル・アナロジーで研究を進めていくとき、そのモデル・アナロジーである「流体」を介して「熱」と「電気」のイメージが相互に変化していくことが想定される。こうしたイメージの相互作用はメタファーの使用などにおいて一般に起こることであり、それと同等の効果について分析する。

(3) 力学的モデルとの関係の評価

これは、モデル化とアナロジーの持つ歴史的社会的意味を分析するものである。近代科学において支配的であった力学的世界観においては、力学的モデルを構築することが理解の実感をともなうものであった。そのため、力学的な機械とのアナロジーが多用された。例えばマクスウェルは、トムソンの熱運動と電気現象の数学的形式の同一性を論じた研究を「アレゴリー」と表現している。これは、マクスウェルにとって電気を熱現象との類似性は本質的なことではなかったことを示している。逆に、自然哲学者にとって本質的ではないと考えられるような「アナロジー」が成立したことが、現代科学の発展への大きな契機になったとも考えられる。このように、研究に用いられる物理モデルと力学的モデルとの関係を分析することで、新しい「科学」の特徴を知ることができると考えている。

(4) 方程式の持つイメージの具体化

一つの方程式には、変数の選び方によって、複数の物理的ふるまいを記述しうる可能性

がある。例えば、ある変数の時間微分と位置微分では、物理的イメージとしては、前者は動的であり後者は静的であるため、まったく異なるものである。しかし、同一形式であるために方程式の持つイメージには類似性があると考えられる。例えば、熱運動と電気現象の数学的形式の同一性を論じる場合、「熱」は移動するが、「電気（静電場）」は移動するわけではない。しかし、この物理的にはまったく異なる現象を共通の方程式で結びつける場合には、そこに共通のイメージがあると考えられる。そして、そうした方程式の持つ共通のイメージこそが、力学的世界観が変わって、現象の法則に理解の実感を与えているものと考えられる。そして、このような数学についての分析枠組みは、科学における数学の認知的役割を解明するためのものであり、科学技術論の新しい方法を切り開こうとするものである。

(5) 道具あるいは実験機器の与えるイメージの評価

19世紀のイギリスの科学者は、理論だけを研究する科学者は少なく、同時に実験による研究も進め、実験機器にも精通していた。とくにトムソンは、さまざまな電磁気学の測定機器を開発している。こうした実験機器の形状は知識をモデル化したものであり、その形状は知識の形成に影響を与えていると考えられる。20世紀後半から、実験機器について科学技術論が注目されるようになり、また少しずつ展開を見せているが、累積的な研究には至っていないのが現状であろう。この原因には、着眼点の新しさにとまらぬ分析枠組みの未熟さがあげられる。この研究は、実験機器の科学技術論の分析枠組みにおいても、新しい可能性を切り開こうとするものである。

以上のようなモデルやアナロジーの分析によって、トムソンにおける電磁気学の「理解」のあり方と、19世紀イギリスにおける歴史的・制度的基盤との相関関係を理解することを目的とする。

なお、研究が進むにつれて、トムソンの前世代にあたるファラデーの研究や、さらに彼らの思想的背景の起源となった18世紀イギリス経験論のとくに感覚論についての理解を深めることが重要であることを強く認識するようになった。イギリス経験論は、ロックの『人間知性論』を出発点とする哲学的な議論であるが、心理学や脳科学がそもそも存在していなかった18世紀においては、人間の認識論についての最先端の考察であり、当時の人々が自然現象を理解する上での認識のあり方を歴史的に考察する上での重要な資料となりうる。そのため、上記の(1)～(5)の方法に加えて「感覚 (sense)」とい

うキーワードに着目しながら、イギリス経験論のとくに常識学派を中心とするスコットランド哲学の自然現象と感覚についての議論と、ファラデーやトムソンが感覚について言及しながら自然現象について論じている資料とを比較検討し、その関連性を探る作業を進めることにした。

4. 研究成果

年度ごとの研究成果は以下ようになる。まず 2007 年度においては、研究実施計画に基づき、7 月に約 2 週間、スコットランド国立図書館およびグラスゴー大学図書館の資料室にて調査を行った。その結果、ファラデー効果（光磁気効果）の発見とその理論的解釈が、ウィリアム・トムソンを中心とした 19 世紀における電磁気学の理論展開に重要な影響を与えていることをあらためて確認した。ファラデー効果は、光と磁気という、異なる分野の現象の相互関係を実証したものである。これは、物理学の諸力が何らかの統一的な力の現れ方の違いである可能性を示唆しただけでなく、研究の方法・形式においても積極的な分野間の乗り入れが可能であることを示唆するものであった。すなわち、異なる物理現象のあいだの物理量の形式上の関係性を考えるアナロジーの重要性が、意識的あるいは無意識的に大きくなっていった。このようにアナロジーを想定することは、研究者が物理的実在物そのものに対して抱いているイメージが、研究において導入されるモデルとは必ずしも一致しないことを意味する。一般には、物理学者が自然を解釈するために導入するモデルは、自然そのものを単純化ないし理念化したものと考えられる。しかし、こうした一対一の対応関係は、19 世紀の電磁気学において必ずしも正しくない。しばしば物理的意味の異なる複数のモデルを用いながら現象を説明していく過程は、物理学と数学とがより密接に関連していく過程であるとともに、物理学が自然そのものの解釈（すなわち自然哲学）とは相いれなくなっていく過程でもあった。2007 年度においては、これらの成果をもとに 12 月に学会発表をおこない、それをまとめた論文を 2008 年 3 月に発表した。

2008 年度においては、研究実施計画に基づき、5 月にイギリス・ケンブリッジ大学で、7 月にはロンドンで大英図書館を中心にして、それぞれ資料調査をおこなった。これらの資料調査を進める中で、また 2007 年度から継続的に進めていた力学的モデル（これは必ずしも今日的なイメージでの「力学」ではなく、機械論的なイメージに近い）と微分方程式との関係についての論文の執筆を進めた。そし

て、その過程で、19 世紀のイギリスの電磁気学を評価する上では「感覚」というキーワードが極めて重要であることがわかった。

「感覚」はジョン・ロック以来、物質の性質を「一次性質」「二次性質」「力能」に分類して理解する上でのキーワードとなっている。これらの性質は、それぞれ力学、物理学（音、光、熱など）、および電磁気学と化学という学問分野を分類する上での基準にもなっている。ただし、電磁気学は当時の最先端科学であり可感な運動の学である力学と可感ではない運動の学である化学との中間に位置していた。そのため、電磁気学研究に対するアプローチには、可感な世界の原理で進ようとする力学側からの研究と、可感な世界の原理とは異なる原理であることを想定する化学側からの研究があった。前者の研究が、力学的モデルを応用しようとするトムソンやマクスウェルの方法であり、後者が力線を導入しようとするファラデーの方法である。これらの研究が 19 世紀中葉から互いに歩み寄って影響しあうことで、電磁気学は形成されたと言える。

2008 年度においては、上記のように、力学的モデルや科学の階層的分類が「感覚」と結びつけて理解できることを明らかにし、それを実験機器研究に結びつけるよう考察を進めた。この成果の一部を 2009 年 5 月の科学史学会にて発表し、同内容を詳しく論じた論文を執筆中である。

なお、2 年間の研究を終えて、当初はトムソンに焦点を絞ることを考えていたが、考察の対象となる範囲を広げざるを得ず、この 2 年間でおこなった学会発表および論文ではファラデーを中心的に扱う結果となった。しかし、現在は 2007 年度より着手しつつ中断していたトムソンの力学的モデルの議論と数学との関係にテーマを絞った論文を執筆再開している。そこで研究成果として現時点で得ている考察をあげると次のようになる。

トムソンの物理的描像とフーリエやストークスの物理的描像とはそれぞれ異なるものであった。トムソンの物理的描像とは静止した歪みであり緊張状態であった。その一方でフーリエの議論は拡散という空間移動をとまなうものであり、ストークスの議論も振動という空間移動をとまなうものであった。そうすると、これらをアナロジーとして考えることは物理的実在性のレベルでは無理が生じることになる。

そこでは、熱や電気といった物理現象は単純かつ直接的なアナロジーの関係にあるのではなく、それぞれに対して力学的説明が介入することでアナロジーが成立している。そしてこの力学的説明においては、力を伝えているという意味でのみ流れを意味する、実際の空間移動をとまなうわけではない流束と

いう概念が導入されるのである。この力学的説明は数学的な形式を論じるためのものであり、実際の空間移動との関係は必ずしも問われなかった。だからこそ、変数の関係性を記述するものとしてアナロジーを構築することができたのである。

なお、トムソンは隣接粒子の微小変位を想定していた。しかしその隣接粒子が作用を及ぼされて生じる変位とは、実際の空間的な変位というよりもあくまで力学的な「表現」に過ぎないものであった。このように作用が及ぼされても空間的な変位を生じることのない均質な固体、これこそが場の概念の萌芽であったと言えるだろう。そこで扱われる微小変位は、むしろ空間的な変位ではないがゆえにポテンシャルを持った緊張状態にあると考えられる。この緊張状態は、その作用の源とその作用が及ぼされる点の両端において大きさが等しいものものであった。この大きさの等しさは、その両端のあいだで力が伝わっていると考えたときに、それが保存されていると解釈することができる。そのため、電気の力を流れとして考えることができたのだ。そして緊張状態が保たれ平衡状態であるがゆえに、時間変化は生じないことになったのである。

一般に、数学は論理的なものであると考えられている。事実、数学は一般的な言語とは異なり、きわめて論理的な記号の体系を持っている。そのため、数学を用いた場合、議論を展開する過程はきわめて論理的である。しかし、方程式はそのままでは記号の集合であり、自然を論じるためには、その記号の集合を自然現象に対応づける必要がある。これが力学的モデルの役割である。このように自然現象を方程式の記号に置き換えるという最初の段階において、数学には本質的に解釈の多様性が生じる。この解釈に存在するあいまいさは、一般言語を用いた論理展開、いわゆる哲学的な議論では論理的に許されず避けることのできないいくつかの概念の論理的矛盾を不問にして、議論を先に進めることを可能にするのである。こうして、熱と電気のアナロジーは、力学的理論という関係を論じる上での数学的に厳密な方法を与えられることによって可能となったのである。

なお、今回の研究を通じて、研究の方法として掲げた(1)～(4)の論点については、ある程度のまとまった研究成果が得られつつある。しかし、(5)の実験機器との関係については、なかなか有用な考察を得られずにいる。しかし、今回の研究を通じて、当時の感覚の議論と力学的モデルの位置づけとの関係が明確になりつつあり、この研究をさらに続けることによって、近年において注目度が上がっている実験機器の科学史についても理論的な分析枠組みを提供できることが

期待される。この点をとくに今後の課題としたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 夏目賢一「ファラデー効果の実験と解釈」『科学史・科学哲学』21号、2008年、19-34、査読なし

[学会発表] (計2件)

- ① 夏目賢一「ファラデーの電磁気学研究と感覚可能性」日本科学史学会(平成21年5月24日:九州大学)
- ② 夏目賢一「ファラデー効果のエーテル解釈」科学史西日本大会(平成19年12月8日:京都教育大学)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

夏目 賢一 (NATSUME KENICHI)
金沢工業大学・基礎教育部・講師
研究者番号: 70449429

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし