

科学領域の熟達者のアナロジーの使用方法 —問題解決および科学的な探究過程に着目して—

内ノ倉真吾*

(2015年10月27日 受理)

The Way of Using Analogy by Experts in Scientific fields:
Focusing on Problem Solving and Scientific Inquiry Process

UCHINOKURA Shingo

要約

理科教育におけるアナロジーによる理科教授法の開発に向けて、問題解決および科学的な探究過程に着目して、アナロジーの目的・機能、アナロジーの生成、アナロジーの評価、アナロジーの内容領域、アナロジー使用とその環境の観点から、科学領域の熟達者のアナロジーの使用方法を特徴付けた。科学者は、科学的な探究の過程や問題解決の過程において、自発的にアナロジーを使用し、問題の解決や状況の改善を試みようとしていた。そして、そのアナロジーの使用の過程は、力動的でありアナロジーの生成・評価・修正の過程が一体的に遂行されていた。さらには、思考実験などの他の思考様式との併用が見られるなど、初心者と比べて、動的な活用過程であった。

キーワード：科学領域、熟達者、アナロジー、科学的な探究過程、問題解決過程

1. はじめに

科学領域の専門家としての学習・経験の違いを考慮した上で、科学的な探究の営みや問題の解決に関わる状況でのアナロジーの使用の特徴を探ろうとする試みである熟達者研究がある。今やこの熟達者研究の知見は、理科カリキュラムの構成、教授ストラテジーの開発などへ貴重な示唆を与えるものと考えられている。

科学領域の熟達者のアナロジー使用を参照した教授ストラテジーとしては、クレメント

* 鹿児島大学教育学系 准教授

(Clement, J., 1993) のブリッジングストラテジーがよく知られている¹⁾。そのブリッジングストラテジーであっても、熟達者のアナロジー使用のすべての側面を参照したわけではなく、アナロジーの評価に関わる部分のみに着目して、教材（ベース）の選択・配列の原理として再構成し、理科学習を促進する手立てとして利用してきたのである。また、そこで主として参照された熟達者のアナロジー使用は、問題解決過程におけるそれであって、観察・実験活動や理論構築などの科学的な探究過程におけるそれなどは含まれていない。したがって、熟達者のアナロジー使用の他の側面、例えば、アナロジーの生成や機能的な活用やより広範な熟達者研究の知見などは扱われないままである。もちろん、熟達者のアナロジー使用のあらゆる側面がそのまま教授ストラテジーに組み込めるとは限らないが、少なくとも熟達者のそれは当該領域におけるモデル＝見本例とも考えられる。

そこで本稿では、アナロジーによる理科教授法の開発に向けて、問題解決および科学的な探究過程に着目して、科学領域の熟達者のアナロジーの使用方法を特徴付けることにしたい。

2. 研究の方法

チ (Chi, M.T.H, 2006) によると、熟達者研究は、基本的な前提や対象者から大きく2つのアプローチに分けられるという²⁾。すなわち、個人の生得的な能力や機会から生み出されたような例外的あるいは絶対的な熟達者についての研究と、当該分野にそれほど習熟していない初心者との比較によって捉えられる相対的な熟達者についての研究である。前者は、科学史に足跡を残した科学者や同時代の傑出した科学者に着目した研究であり、後者は、科学領域の熟達の程度が異なるものを対象にした研究である。

本稿では、チ (2006) の指摘する2つの熟達者観（絶対的・相対的熟達者）に基づいた熟達者研究のいずれも含み、多様なアプローチによって明らかにされてきた科学領域の熟達者のアナロジー使用に関する知見を検討・整理した。具体的には、心理学的アプローチ（実験室研究、現場研究）、科学史のアプローチ、科学哲学的アプローチという各種研究方法論の立場から調査・分析がなされ、一定の研究成果の蓄積が認められる代表的なものに着目して文献調査を行った。そこで見出された知見を整理・統合して、アナロジーの目的・機能、アナロジーの生成、アナロジーの評価、アナロジーの内容領域、アナロジー使用とその環境の5つの観点から、科学領域の熟達者のアナロジーを特徴付けることにしたい。

3. 熟達者の問題解決におけるアナロジーの認知的過程

(1) 熟達者の問題解決におけるアナロジーの主要な認知プロセス

熟達者のアナロジーの認知的過程については、熟達者の問題解決過程での自発的なアナロジーの活用を思考発話法によって探ったクレメントの一連の研究が代表的なものとして知られており、その成果をまとめた *Creative Model Construction in Scientists and Students; The Role of Imagery, Analogy, and Mental Simulation* (Clement, J., 2008) が成書として刊行され

ている³⁾。

クレメント (2008) では、熟達者がアナロジーを使用する認知プロセスとして、アナロジーの生成、アナロジーの評価、アナロジー (ベース) の理解の評価、アナロジーの適用という4つの段階に分節化されている⁴⁾。このうちアナロジーの評価、ベースの理解の深化、アナロジーの適用という段階は、熟達者の認知的過程においては必ずしも順番が固定化されているわけではなく、どの順番からでも始めることができ、その順番は前後できるものである⁵⁾。

クレメントの一連の熟達者研究では、гентナー (Gentner, D., 1983) の構造写像理論⁶⁾などで考えられていたような規範的なアナロジーの生成ばかりではなく、熟達者のアナロジー使用には、多様な方法があり得ることが明らかにされている。また、熟達者と初心者とを比較した場合、初心者 (この場合、主として大学生) であっても、問題解決場面で自発的にアナロジーを使用して概念的な進歩を遂げることがあるものの、熟達者がアナロジーの評価を重視しており、誤った理解を生じさせうる多くのアナロジーを棄却するのに対して、初心者はあまり自分自身のアナロジーを批判的に評価できていないとされる⁷⁾。

以下では、クレメント (2008) が指摘している熟達者のアナロジー使用の認知プロセスのうち、熟達者研究の顕著な成果と言え、熟達者のアナロジー使用を特徴付けるアナロジーの生成方法と評価方法に着目して、具体的な事例に則してその内容を探ることにしたい。

(2) 熟達者の問題解決におけるアナロジーの生成方法

クレメント (Clement, J., 1982) は、技術分野 (technical field) の博士課程の院生と教授に対して、同じ重りを下げた2つのバネの伸びの問題 (図1) を提示し、それを解決していく過程を思考発話法にて調査している⁸⁾。自発的なアナロジーとして判断する基準として、第一に、元の問題状況と類似しているが異なる事例を考え出している、第二に、最終的に問題の答えを得られるかどうかを試みている、第三に、構造的あるいは機能的な類似性がなく表面的な類似のみに言及したものは除く、第四に、その他の問題解決過程に含まれるものを除く、という4つを設定して分類したところ、このバネ問題を解決する過程で、10人の熟達者から38つのアナロジー (1人あたり8つのアナロジー) が考え出されたのであった⁹⁾。

クレメント (1988) では、熟達者がバネ問題を解決するために用いた38つのアナロジーのうち、発話データの不足などもあって判断できなかった4つを除くと、熟達者のアナロジーの生成方法は、「原理を経ての生成 (generation via a principle)」、「連想を経ての生成 (generation via an association)」、「変形を経ての生成 (generation via a transformation)」の3つに分類されている。

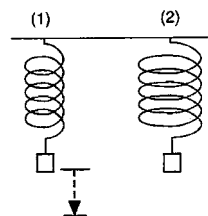
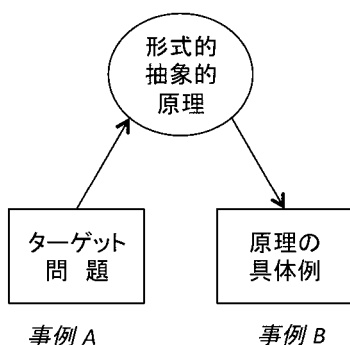
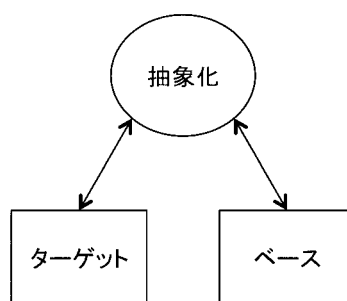
アナロジーの生成方法の一つ目である「原理を経ての生成」とは、確立された等式あるいは形式的・抽象的な原理が2つ以上の異なる文脈で適用されるものであり、原理Pの具体例として事例Aが認識され、それに類似するBが第二の例として考え出される、というものである (図2)¹¹⁾。

おもりがバネにつるされています。もとのバネ (1) を次のようなバネ (2) に置き換えます。

- ・ 同じ針金でできています。
- ・ 巻き数は同じです。
- ・ でも 2 倍の直径で巻きになっています。

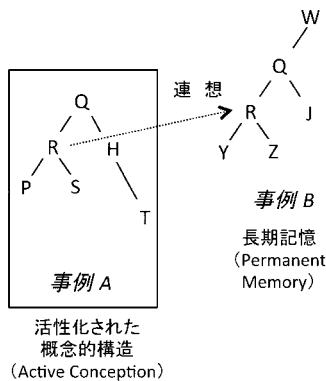
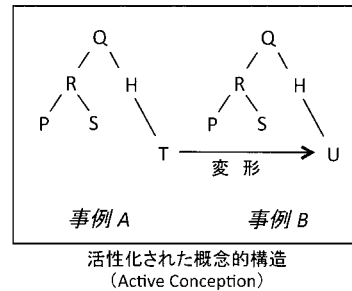
同じおもりをつるしたとき、そのバネはもとの伸びよりも長く、もしくは短くなりますか。あるいは、同じ長さ伸びますか (ただし、バネの質量はおもりの質量に比べて無視できるものとします)。

どうしてそのように考えますか？

図 1. バネ問題¹⁰⁾図 2. 原理を経てのアナロジーの生成¹²⁾図 3. 準抽象理論でのアナロジーの生成¹³⁾

この原理を経てアナロジーが生成するという認知的過程は、鈴木 (1996) が提案した「準抽象化理論」との類似性が見られる (図 3)¹⁴⁾。鈴木 (1996) によると、アナロジーの生成・活用 の目標や文脈が観点として設定され、「抽象化」(されたもの) が検索されることによって、ベースとターゲットの類似性が認識されると考えられている。そして、アナロジーの認知的過程は、各要素を個々に対応付ける、いわゆる、「写像 (mapping)」というよりはむしろ、一種の演繹的な推論と見なせるのである¹⁵⁾。このことからして、熟達者のアナロジー生成では、単純に帰納的な過程だけではなく、演繹的な過程もありうる。

一方、クレメント (1988) の調査によると、アナロジー生成の主要な認知プロセスは、「連想を経ての生成」と、「変形を経ての生成」によるものであった。連想を経ての生成とは、事例 A から長期記憶の中にある事例 B を連想すること (association) であり、それらの事例は、多くの意味で、元々の問題とは異なっているかもしれないが、元来の状況と共通する重要な特徴だけはもっている (図 4)¹⁶⁾。連想を経て生成されたアナロジーは、ベースとターゲットとの間には、共有される特徴に限られているという意味で、後述の変形によって生成されたものに比べて、もともとの状況とは概念的に「離れて」いる傾向にある¹⁷⁾。

図4. 連想を経てのアナロジーの生成²⁰⁾図5. 変形を経てのアナロジーの生成²¹⁾

アナロジーの生成方法の三つ目である変形を経ての生成とは、元々の状況である事例 A を修正し、それによって、以前は固定されていると仮定された、いくつかの特徴を変化させることによって、別の状況である事例 B を作り出すことである（図5）¹⁸⁾。したがって、変形によってアナロジーを生成した場合は、ターゲットに近いものがベースとして構成もしくは選択されることになる。

特に、変形を経てのアナロジーに分類されるものの中には、必ずしも調査対象者の過去の経験から導かれたとは思われないような新奇な事例が含まれていた。クレメント（1988）は、このようなアナロジーの生成について、新しい経験的な観察を行うことなく新しいシステムの振る舞いを予測しうる状況を考案しているという意味で、「思考実験（thought experiment）」であると指摘している¹⁹⁾。

(3) 熟達者の問題解決におけるアナロジーの評価方法

クレメント（1982）と同様に、技術分野（technical field）の博士課程の院生と教授を対象にして、力学の問題解決における自発的なアナロジーの使用を探ったクレメント（Clement, J., 1998）は、熟達者のアナロジーの評価方法として、ベースとターゲットのそれぞれの属性を対応付ける「写像」と、第一のベースに加えて、第二のベースを考案・選択して、ベースとターゲットとの関係性を評価する「橋渡し（bridging）」という2種類があることを明らかにしている²²⁾。クレメント（Clement, J., 2004）では、その2つの他に、先にアナロジーの生成方法として挙げられていた「変形」と、ベースとターゲットの関係がイメージ上の操作（シミュレーション）で比較されるとする「デュアルシミュレーション」も、アナロジーの評価方法として加えている²³⁾。クレメント（1998）とクレメント（2004）から、熟達者のアナロジーの評価方法としては、「写像（mapping）」、「橋渡し（bridging）」、「保存しながらの変形（Conserving Transformation）」、「デュアルシミュレーション（Dual Simulation）」の4つが知られている。

ここでは、その方法がこれまで知られていなかったものであると同時に、熟達者によく使われていたとされる方法である「橋渡し」と「保存しながらの変形」を取り上げる。

クレメント (1998) では、図6の事例 A にあるように、車輪を斜面方向に動かすときに車輪を押す場所 (X と Y) によって必要な力が異なるのかどうかの問題と提示されている。

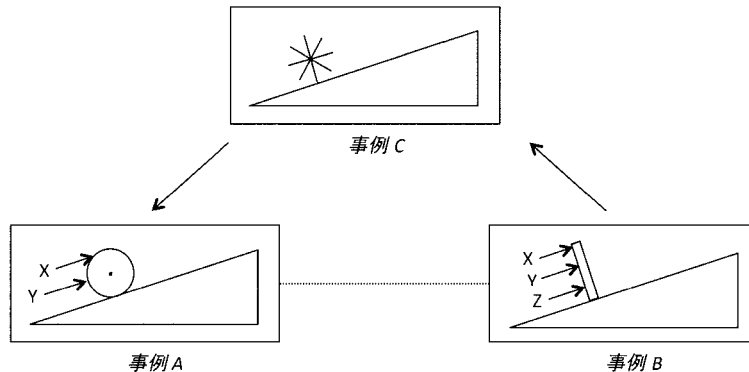
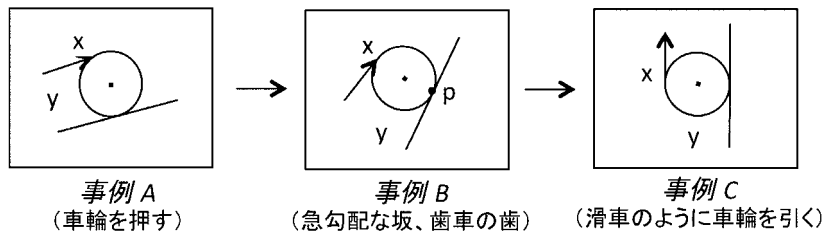


図6. 橋渡しを経てのアナロジーの評価²⁴⁾

この問題を解決するとき、ある1人の調査対象者は、この問題 (事例 B) を考え出して、両者の事例がうまく対応するかどうかを評価している。これは、ターゲット (事例 A) とベース (事例 B) の対応関係の妥当性を考えているという意味で、写像という評価方法である²⁵⁾。この対象者は、写像での評価に基づいて、事例 A では力を加える場所で支点が動くのに対して、事例 B では支点が固定されている点が潜在的に異なることに気付いた。そして、スポークだけの車輪からなる事例 C を新たなベースとして考案したのであった。この事例 C は、リムがない車輪として考えられるという意味で事例 A にも、複数のてこが組み合わせたものと見なせるという意味で事例 B にも、類似した属性を持ち合わせたものとなっている。クレメント (1998) は、事例 C が事例 A と事例 B の両者にまたがる中間的な属性をもっていることから、橋渡し事例と呼んでいる。「橋渡し」については、それ以前にはアナロジーの評価方法としては知られていなかったものであり、熟達者を対象にした調査によってはじめて明らかにされたものである。それは、車輪の問題だけではなく、別の問題でも、別の熟達者が同じように橋渡しによるアナロジーの評価を行っていることが報告されている。

クレメント (1988) では、アナロジーの生成方法として挙げられていた「変形」であるが、クレメント (2004) では、これがアナロジーの評価方法でもあることが指摘されている。図7に見られるように、ターゲットである事例 A (車輪) から事例 B (歯車)、そして、事例 C (滑車) というように、新しいベースへと変形されていっている。

その過程は、アナロジーの生成過程であると同時に、重要な特徴や関係性が保存されているかどうか確かめながら進められているという意味で、アナロジーの評価方法とも見なされているのである。熟達者は、問題を解決している間、数十分という調査時間も長かったというこ

図7. 変形によるアナロジーの評価²⁶⁾

とを差し引いても、単純に多くのアナロジーを生成して、それらを評価するということを繰り返していた。そのような認知的過程では、アナロジーを生成しつつ評価することができる、「変形」という方法がとられていたものと考えられる。

これらのことから、熟達者は問題解決において、複数のアナロジーの生成方法や評価方法を駆使しているのである。そして、熟達者が重点を置いているアナロジーの評価は、自分自身の問題解決の方法をモニタリングし、必要に応じてコントロールする認知的な活動、すなわち、メタ認知である。このメタ認知は、一般的に、熟達者としての重要な能力と考えられており²⁷⁾、アナロジー使用においても、同様に重要な機能を果たしているのである。

4. 熟達者の科学的な探究活動におけるアナロジーの活用

(1) 科学史で重要と見なされるアナロジー

科学的な探究においても、アナロジーは、重要な役割を担っていると考えられている。ホリオーク＝サガード (Holyoak, K. J. & Thagard, P., 1995) は、アイデアの発見や発展や後の論争における擁護などの科学者の思考の重要な段階で明らかに貢献したと見させるもの、アナロジーを含んだ科学者の思考が主要な理論的進歩に貢献したもの、という2つの基準に基づいて、科学史で数多く見られるアナロジーの中から近代科学以降に通じるより重要なアナロジーを挙げている²⁸⁾。

科学史で重要と見なされてきたアナロジーは、ベースとターゲットの領域が離れたものがよく知られており、それが創造性を象徴的に表すものとして考えられる傾向にある。例えば、ホリオーク＝サガード (1995) は、研究の対象としている事物・事象とは、一見かけ離れているものに着目することによって、当該事物・事象の性質や規則性を見出しうるところにアナロジーの意義があり、最もかけ離れた領域同士を結び付けたものが最も創造性に富んだものであると言う数学者の J. H. ボアンカレの言葉を引用し、離れた領域から構成されるアナロジーの創造性を指摘している²⁹⁾。

ただし、これらのアナロジーのすべてが、科学的な探究としての成果に直接的に関わる状況で使用されたかどうかまでは、十分に裏付けられているわけではない。

(2) 科学者の実験室活動におけるアナロジー使用の目的と領域性

前項で取り上げたクレメント (2008) をはじめとする一連の研究は、心理学での実験室研究の枠組みの中で、熟達者の問題解決過程におけるアナロジーを調査したものであった。それに対して、ダンバー (Dunbar, K.) は、実際の科学者の実験室活動を長期的に参与観察して、科学的な探究活動におけるアナロジーの使用の実態解明を試みている。なお、ダンバー=ブランシェット (Dunbar, K., Blanchette, I., 2001) は、生物学の研究アプローチとのアナロジーに基づいて、統制された実験室で認知研究が行われる前者をインビトロ (*in vitro*) アプローチ、自然な文脈で認知研究が行われる後者をインヴォ (*in vivo*) アプローチと呼んでおり、双方のアプローチを結び付けて研究することの重要性を指摘している³⁰⁾。

ダンバー (Dunbar, K., 1995) は、ノーベル賞受賞者を含む専門家へのヒアリングや発表論文データに基づいて、アメリカの大学の分子生物学分野で学術的な業績や評価の高いと目される研究グループ6つを抽出し、そのうち研究の趣旨や方法に適する4つの研究グループでの実験室活動 (特に、研究グループでのミーティング) に定期的におよそ1年間参加し、ビデオ録画やインタビュー調査を行い、科学的な探究活動で用いられる思考様式を調査している³¹⁾。

ダンバー (1995) は、調査で確認されたアナロジーの特徴として、ベースとターゲットの領域間の距離に着目しており、その距離に基づいて、3つに類型化している³²⁾。それは、第一に、科学者が現在行っている実験以前に行った実験というような同一領域とのアナロジー (領域限定的なアナロジー (local analogies)), 第二に、高次のカテゴリーは共通しているものの、下位カテゴリーが異なる近接領域とのアナロジー (特定領域アナロジー (regional analogies)), 第三に、科学者が研究している領域とはまったくかけ離れた遠隔領域とのアナロジー (遠隔アナロジー (long-distance analogies)) である。この場合、分子生物学の研究であるため、同一領域とのアナロジーとは、同じ生物から導かれるもの、近接領域とのそれは、異なる生物から導かれるもの、遠隔領域とのそれは、非生物などの事例から導かれるものに分類される。

ダンバー (Dunbar, K., 1997) によると、4つの研究グループの合計16ミーティングでは、総計99個のアナロジーが確認されているが、科学者が使用する3種類のアナロジーについては、当該アナロジーを使用する状況や目的に応じて、それぞれの使用頻度が異なっている (表1)³³⁾。なお、科学者がアナロジーを使用する目的は、「仮説の形成」、「実験の計画」、「実験の改善」、「説明の付与」に分類できるものであったとされている³⁴⁾。

まず、アナロジー使用の目的という観点から、表1の結果を見ると、科学者が実際の研究活動において使用しているアナロジーのうちおよそ半数は、「説明の付与」であり、その説明の内容は、方法論的な問題に関するものであったとされている。続いてアナロジーの目的として多かったのは、「仮説の設定」、そして、「実験の計画」であった。

次に、アナロジーの領域性という観点から、表1の結果を見ると、科学者が実際の研究活動において使用しているアナロジーは、ベースとターゲットの領域がまったく異なる遠隔領域のそれではなく、むしろ、ベースとターゲットが同一もしくは近接領域のそれであることが分かる。

表1. 科学者のアナロジーの領域とその使用の目的³⁵⁾

目的の種類	同一領域 アナロジー	近接領域 アナロジー	遠隔領域 アナロジー	合計
仮説の設定	3	20	0	23
実験の計画	9	12	0	21
実験の改善	5	5	0	10
説明の付与	23	20	2	45
合計	40	57	2	99

アナロジーの使用と領域性との観点から見ると、第一に、調査対象になった科学者は、遠隔領域のアナロジーをほとんど使用しておらず、使用している場合であっても、その目的は「説明の付与」に限定されていた。遠隔領域のアナロジーは、実験上の問題やモデルの構成には使用されておらず、もっぱら、研究の特徴を強調するためや新規の実験室スタッフを教育するために使われていた³⁶⁾。参与観察した実験室のいくつかでは、実際に分子生物学上重要な発見も行われていたことを踏まえると、科学史で重要なアナロジーのほとんどが遠隔領域のアナロジーであり、それによって科学的な発見が促進されたという素朴なイメージとは、異なるものとなっている。むしろ、科学的な発見で重要となる「仮説の設定」や「実験の計画」には、同一もしくは近接領域から導かれたアナロジーが頻繁に使用されている。

同一領域と近接領域とのアナロジーの使用頻度には、「実験の計画」や「実験の改善」といった実験の条件制御をはじめとする手続きでは、それほどの違いが見られていない。しかしながら、「仮説の設定」に関しては、同一領域と近接領域とのアナロジーの使用頻度には明らかに違いが認められ、近接領域とのアナロジーの使用頻度が高いのである。このことからして、科学者は、実験の手続きは同じか近い領域から改善策を探してくるのに対して、新しい仮説を設定する際には、研究対象としているものとはやや異なる領域からアナロジーを導いてくる傾向が認められるのである。

ダンバー（1995, 1997）の参与観察から得られた知見以外に、他の調査方法によっても、科学者が近接領域とのアナロジーを使用する傾向があることが指摘されている。例えば、生理学領域の熟達者と初心者を対象にして、思考発話調査にて、熟達の程度とアナロジーの内容構成や機能の関係を調査したカウフマンら（Kaufman, D.R. et al., 1996）によると、熟達者ほど、ベースとして同一領域や近接領域を選択し、初心者は、ターゲットとかけ離れた領域を選択する、という傾向がある³⁷⁾。そして、熟達者ほど、自分自身の説明を明解にする、または、拡張するなどのコミュニケーションを促進するために、離れた領域とのアナロジーを使用しているのに対して、初心者は、説明すべき対象と自分自身の理解状態とのギャップを埋めるために使用している。つまり、アナロジー使用の目的に関連して、熟達の程度によって、アナロジーの内容の選択も異なっていたのである。なお、ダンバー（1995）では、個々のアナロジーの生成の主

体とアナロジーの目的や領域性についての詳細は示されていないが、研究グループ内での熟達の程度が高いほど、科学的な発見につながるようなより生産的なアナロジーを生成する傾向が指摘されている³⁸⁾。

それ以外に、国内外で活躍が認められている多様な研究分野の科学者を対象にしてインタビュー調査を行った植田(2000)でも、ベースとターゲットの距離を客観的な距離として見た場合、科学者は同一もしくは近接領域とのアナロジーを使用する傾向があることが報告されている³⁹⁾。

(3) 科学者の実験室活動におけるアナロジーの生成と保持

ダンバー(1997)は、分子生物学の科学者が近接領域(異なる生物)とのアナロジーをよく使用する要因として、アナロジーの生成方法を挙げている。そのアナロジーの生成方法とは、相同性(ホモロジー homology)を利用する方法と抽象的な知識を利用する方法である⁴⁰⁾。前者の方法とは、遺伝子における塩基対配列コードを特定し、それを遺伝子データベースにて、相同的な遺伝子配列を検索し、当該遺伝子の機能を推測するという分子生物学特有の方法である。前項で取り上げたクレメント(2008)には見られない、研究領域に特有のアナロジーの生成方法であり、相同性を利用したと思われるアナロジーの生成は、近接領域のアナロジー生成の半数超の頻度であった。

一方、その残りのうち主要なものは、抽象的な知識を利用したアナロジーの生成であった。抽象的な知識の利用という方法は、クレメント(2008)が指摘する「原理を経ての生成」と基本的には同じものである。クレメント(1988)では、「原理を経ての生成」によるアナロジーの生成の頻度は少ないものと見なされていたが、ダンバー(1997)では、学問領域固有の方法である相同性を利用したアナロジーの生成に続いて、抽象的な知識の利用が主要な方法と見なされている。クレメント(1988)では物理学分野、ダンバー(1997)では分子生物学分野という学問領域の異同が、アナロジーの生成方法の頻度に関係している可能性も推察しうるが、いずれにせよ、科学の異なる領域でも、「原理を経ての生成」が熟達者のアナロジーの生成方法であることは認められよう。

同じ分子生物学の研究グループであっても、当初の実験が予定していたとおりの結果が得られないなどの同じ状況に直面して、すべての実験室で同じようにアナロジーが生成されていたわけではなかった。もちろん、研究を進める方法はアナロジーに限定されず、他のストラテジーも活用できうるのだが、ダンバー(1995)は、アナロジーをあまり使用しない傾向にあった研究グループでは、他の研究グループと比較して、構成メンバーの学問的な背景が均質的であったことが、そのアナロジー使用の低頻度の要因としており、グループ構成員の均質性がアナロジー使用の活性化に及ぼす可能性を示唆している⁴¹⁾。

これまで見てきたように、科学者は、科学的な探究活動の重要と思われる場面、すなわち、仮説の設定、実験の計画・改善、説明の付与といった段階で、比較的頻繁にアナロジーを生成し、活用している。そして、当該アナロジーは、科学的な発見にもある一定の貢献を果たして

いるものと思われる。その一方で、アナロジーが学術的な進展に貢献したと思われる場合であっても、ミーティング終了後のインタビュー調査で、その当事者である科学者に、ミーティングの過程で生成・活用したアナロジーについて尋ねても、ほとんど記憶していない⁴²⁾。そして、新しい考えが生み出されるとアナロジーは容易に忘れさられ、記録されることもない。つまり、科学者にとって、アナロジーは、科学的な探究活動でその目的に応じて生成・活用されて、一定の知的貢献を果たすものの、その目的が達成されると自然と放棄・忘却されるような暫定的な特性をもつ認知的な道具なのである。

5. 歴史的な科学者の理論構築過程におけるアナロジーの活用

(1) 歴史的な科学者としてのJ.C. マクスウェルとそのアナロジー

伝統的な科学史の研究手法ではなく、現代の認知科学の知見や理論を活用して、歴史的な事例を検証するという手法を用いて、ネルシェシヤン (Nersessian, N. J.) は、歴史的な科学者の理論構築過程におけるアナロジーの活用を明らかにしている⁴³⁾。ネルシェシヤンは、歴史的な科学者として、近代電磁気学の理論的体系化および熱力学や統計力学の確立に貢献したJ.C. マクスウェルに着目している。

チ (2006) の分類に基づく、ネルシェシヤンが着目した熟達者としてのマクスウェルは、その科学史上の成果から見て絶対的な熟達者である。ダンバー (1995, 1997) が参与観察した科学者も、同時代においては秀でた科学者であるという意味で、前者に含むものと見なさせる。それに対して、クレメント (1988) が対象にした熟達者は、当該分野での専門家であるが、ことさら実績などが記述されていないことを踏まえると、後者の相対的な熟達者であることに主眼が置かれた存在である。なお、ネルシェシヤンは、一連の研究において、マクスウェルを対象にした認知分析に加えて、クレメントの一連の研究についてもメタ分析を行っており、絶対的な熟達者と相対的な熟達者とを比較対照しながら、熟達者としての科学者のアナロジーの活用に関する知見を導き出している。

ネルシェシヤンは、古典物理学に多大な貢献を果たしたマクスウェルの科学的な活動のうち、近代電磁気学の理論構築過程に着目している。マクスウェルは、電磁誘導現象を発見したファラデーをはじめとして、同時代の科学者が実験的に明らかにしてきた電気と磁気の関係性に関する知見を理論的に体系化したのであった⁴⁴⁾。それらの成果は、一連の方程式群として数学化され、当時は存在が知られていなかった電磁波を予測させるものであった。現代では、それらの理論的な構成物は、マクスウェルの方程式と呼ばれており、電磁気学の基礎理論として位置付けられている。マクスウェルは、電磁気現象の数学化・体系化という学術的な貢献の大きさばかりではなく、その論理構築過程において、一般に非論理的と思われるアナロジーも活用しながら、数学化を図ったと見なされている点でも、注目される⁴⁵⁾。マクスウェル自身も、物理学の理論構築過程におけるアナロジーの重要性について、次のように言及している⁴⁶⁾。

物理的概念を組立てるのには、物理的類推（比較）の存在に馴れなくてはならない。物理的類推という言葉のもとに、私は、二つの何らかの現象領域で、法則の部分的な類似を考えている。この類似のために、一方の領域が他の領域のための図解として役に立つのである。

マクスウェルは、電磁気学の理論的な体系化を模索する過程では、熱学や流体力学とのアナロジーを複数活用していたことが知られている。そのなかでも、よく知られているものとして、渦・歯車とのアナロジーがある（図8）。

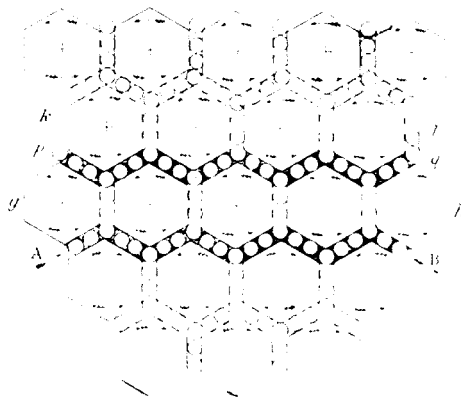


図8. マクスウェルによる渦・歯車とのアナロジー⁴⁷⁾

このアナロジーでは、「渦」（図8中の六角形）が磁場を表しており、その渦と渦の間にある小球が電流（より科学的に言えば、電場の変化である変位電流に相当する）に対応している。図8に基づく、小球がAB方向に移動するとそれに伴って、渦ghが回転を始め、当初の移動とは反対向きであるqp方向に小球が移動する。小球の動きを止めると、止めると同じ向きに別の小球が移動する。これらは、電流を流し始めると、磁場が変化し、それとは反対方向の誘導電流が生じることと、電流を止めると、これまた磁場が変化して、止める前と同じ方向に誘導電流が生じることと、それぞれ対応しているのである⁴⁸⁾。

(2) J. C. マクスウェルの「モデルを基礎とした推論」としてのアナロジーの活用

上述のように、マクスウェルの理論構築過程において、アナロジーが活用されていたことは、よく知られていたことであった。このことに加えて、ネルシェシヤン (Nersessian, N. J., 2002) は、マクスウェルの理論構築過程では、頻繁にアナロジーがその他のモデリングと一緒に活用されていたことを指摘している⁴⁹⁾。対象の表象としてメンタルモデルが形成されるという前提に基づき、そのモデリングに際して頻繁に活用されるものとして、アナロジー的モデリング (analogical modeling)、視覚的モデリング (visual modeling) あるいはイメージ、思考実験 (模擬的モデリング (simulative modeling)) を挙げている⁵⁰⁾。そして、マクスウェルのモデル化の過程⁵¹⁾ についての検討に基づいて、図9のようなモデル化の過程を指摘している。

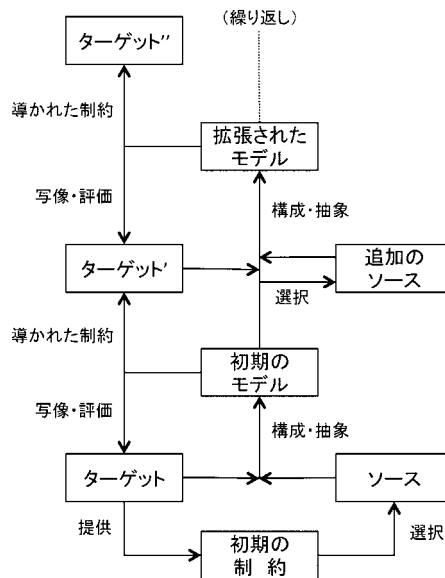


図9. 科学者に見られるモデル化の過程⁵²⁾

ネルシェシャン (2002) が指摘したモデル化の過程とは、以下に述べるような過程と見なされている⁵³⁾。まず、初発の問題となっている事物・事象がターゲットであり、これの顕著な特徴が制約条件となって、ソース (本論文では、ベースと呼んできたもの) が選択されることになる。1861~1862年時点でのマクスウェルにとっては、ソースは、流体力学の事象 (渦など) であった。続いて、ソースである流体现象からターゲットである電磁気現象へと属性が対応付けられるというよりはむしろ、具体的な属性が捨象され、より一般的な属性が抽象されるような両者の相互作用 (比較) によって、初期のモデルが構成される。ターゲットからソースが選択され、そこからモデルが形成されるという、この下位過程は、アナロジーの生成を経たモデルの構築である。ここでのモデルとは、選択されたソースがそのままターゲットに直接的に対応付けられているのではなく、捨象・抽象を経たものである。なお、モデルの構築過程での抽象化には、その他に極限事例 (limiting case)、理想化 (idealization)、一般化 (generalization) などの形式がありうると考えられている。

構成された初期のモデルの妥当性、つまり、ターゲットとなる事象に適合するかどうかについては、思考上で初期のモデルをシミュレーションする、いわゆる思考実験によって検討がなされるのである。科学における現物実験に対しての思考実験とその重要性を提唱したことで知られる E. マッハによると、思考実験の基本的な方法とは、以下の通りである⁵⁴⁾。

思考実験の基本的な方法は、現物実験のそれと同様、変化法である。いろいろな要因を連続的に変化させてみることによって、その要因と結びついている表象 (期待) の妥当範囲が拡張

される。当の要因を変様させたり、特殊化することによって、表象を変様させ、特殊化して、一層確定的なものにする。これら二通りの変化過程は交互におこなわれる。

上記のような思考実験は、理想化された概念上でのモデルを動的に操作・活用しているという意味で、シミュレーションとしてのモデリングである。このような思考実験の結果として、初期のモデルとターゲットとが適合しなかった場合、その不適合部分がターゲットの重要な制約条件とされ、新しいソースの選択がなされ、抽象化を経た上で次のモデルが構築されることになる。マクスウェルの場合、渦や歯車とのアナロジーから考え出したモデル（図10の左図）に基づいて、どのように電流が発生するのかを思考実験したと考えられており、そのようなモデルでは、接した歯車同士を回転させると同じ向きに回転し、摩擦が生じうるという問題点（図10の右図）を認識するに至っている⁵⁵⁾。

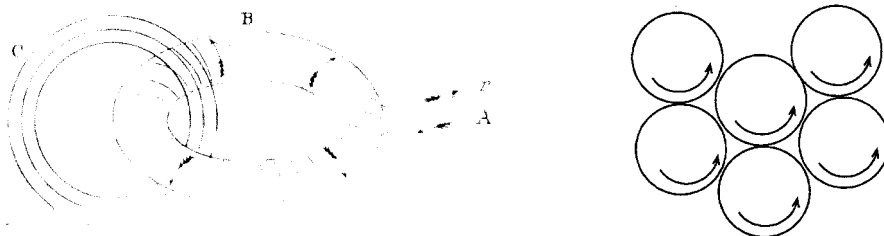


図10. マクスウェルの思考実験の記述（左図）⁵⁶⁾と導かれる結果（右図）⁵⁷⁾

K. R. ポパーによる思考実験の分類に基づくならば、このように思考実験を通じて、概念上の問題点を抽出・特定することは、思考実験の批判的使用に相当するものと言える⁵⁸⁾。

マクスウェルは、先の思考実験で明らかになった問題点を克服するために、機械力学をソースとして、のちに変位電流と呼ばれる電場の作用に相当する「遊び車 (idle wheels)」を導入したアナロジーを通じて、修正されたモデルを構築している。そのアナロジーがよく知られた図8のそれである。なお、図2のようなアナロジーは、必ずしも力学的な因果関係までも含んだものではなく、あくまでも概念的なモデルである。また、必ずしも実在するものでもなくともよいという意味で想像上のモデルであり、それが可視化されるという意味で、視覚的なモデリングとも考えられている。

初期のモデルは、思考実験などを通じて評価され、異なるアナロジーなどを通じて修正され、拡張されたモデルへと移行していくことになる。その際には、概念的な構築物であるモデルを可視化する過程も含まれる。図9でのターゲット、ソース、モデルの3者でもそれぞれ類似関係があると考えられるため、この一連の過程ではアナロジーを活用しているものと言える。ヘッセ（1966）と関連付けて言えば、そのモデリングの過程では、まず、類似が認められる肯定的アナロジー関係と類似しているかどうか不明の中立的アナロジー関係を含むモデルについての評価が行われる。続いて、類似が認められない否定的アナロジー関係が特定・放棄さ

れ、それと同時に、新規の肯定的アナロジー関係が追加・拡張されていくのである。その過程は、まさにモデルの洗練過程である⁵⁹⁾。さらには、科学者の一連のモデリングの過程は、アナロジー的モデリング、思考実験、視覚的モデリングのいずれかが単発的にはたらくというよりは、むしろ、3つのモデル化が頻繁に共起していると考えられ、科学者の理論構築での思考様式的一端は、「モデルを基礎とした推論 (model-based reasoning)」として特徴付けられるのである⁶⁰⁾。

(3) 熟達者に見られるアナロジー使用の共通性

ネルシェション (2008) では、J.C. マクスウェルを中心に、モデルを基礎とした推論の重要性を検討しているが、それ以外の科学者でも同様な推論様式を活用していると思われる事例として、G. ガリレイや I. ニュートンのそれを挙げている⁶¹⁾。

G. ガリレイについては、例えば、著書『天文対話』で地球の運動 (自転) と地球上の物体の運動に関する対話で示した、船の運動と地球の運動とのアナロジーがある⁶²⁾。

もっとも強力なものとしてすべての人が持ち出すのは、重い物体による根拠です。重い物体は高いところから下方に落とされると大地の表面に垂直な直線に沿って進みます。これが大地は不動であるということの議論の余地のない論証と見なされています。というのは、もし大地が日周運動をするならば、塔の頂上から石を落下させると、塔は大地の回転によって運ばれていますから、石がその落下に費やす時間には塔は何百腕尺も東に進み、石は塔の根元からそれだけの距離の間をおいて地面につくはずです。この出来事はもう一つの経験で確認されます。すなわち鉛の球をじっとしている船のマストの頂上から落とすのです。そしてそれが落ちたマストの脚近くに記しをつけます。しかし船が走っているときに同じ場所から同じ球を落とせば、その落ちた場所は鉛の落下時間に船がさきに走っただけの距離をおいてさきの場所からはなれて落ちているはずです。そしてこのことは、自由にされた球の自然的運動は大地の中心に沿ってであるということ以外のことによるものではありません。

この記述は、同書の中でガリレイの代弁者の役割を担っているサルヴィアチの発言の一部である。ここでは、「もし大地が日周運動をするならば、(中略) 石は塔の根元からそれだけの距離の間をおいて地面につくはずです。」という一連の記述がターゲットに、「鉛の球をじっとしている船のマストの頂上から落とすのです。(中略) その落ちた場所は鉛の落下時間に船がさきに走っただけの距離をおいてさきの場所からはなれて落ちているはずです。」という一連の記述がベースに相当する。この後、船の事例や、その後の物体を高く投げ上げる運動や水平方向への大砲の射撃の事例とのアナロジーに基づいて、対話が進行していく形になっている。そして、この進行する対話は、思考実験を形成するものであり、最終的に、「石は船がじっとしていようとどれほどの速さで動いていようと、つねに同じ場所に落ちることが示されるでしょう。ですから大地についても船についても同じ根拠のある以上、石がつねに塔の根元に落ちる

ことから大地の運動についても静止についても何も推論されることはできません。』⁶³⁾ という地球の運動に関する結論が導かれている。

他方、I. ニュートンについては、例えば、自著『自然哲学の数学的諸原理（プリンピキア）』で自身の重力理論によって惑星の軌道が説明できることを示した、物体の水平投射と地球の運動とのアナロジーがある（図11）。

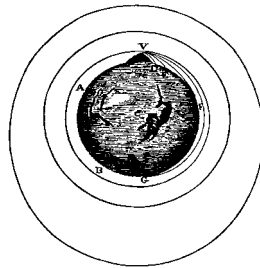


図11. ニュートンの物体の水平投射と地球の運動とのアナロジー⁶⁴⁾

このアナロジーでは、向心力によって惑星が一定の軌道にあることがターゲットに、物体の水平方向への投射運動がベースに相当する。そして、地球上の高い山 V からある速度で水平投射したときの物体の運動について、次のような思考実験を行うのである。物体は、投射する速度の大きさに伴って VD, VE, VF, VG の軌道を描いて、最終的には地球表面 ABF へと落下する。しかしながら、地点 V からある一定の速度よりも大きな速度で投射すると、表面 ABF へと落下することなく、再び地点 V へと戻ってくる運動が可能であるとの結論が導かれるのである⁶⁵⁾。

クレメント（2008）に基づけば、ニュートンによる当該のアナロジーの使用方法は、熟達者の問題解決過程に見られたアナロジーの評価方法の一つである「橋渡し」である（図12）⁶⁶⁾。つまり、物体の投射運動（図12の(c)）を媒介にして、地球上でりんごが落下する現象（図12の(b)）と惑星の運動（図12の(a)）がアナロジーの関係にあると見なせるかどうかを評価しているのである。

さらに、クレメント（2008）は、ガリレイのアナロジーの使用方法にも、橋渡しといったアナロジーの使用方法が認められると指摘している⁶⁸⁾。また、前述のクレメントの一連の研究では、アナロジーの生成や評価の方法には、「橋渡し」以外にも「変形」があることが明らかにされていたが、こちらもガリレイのような歴史的な科学者が使用していた可能性が認められている。これに関連して、高橋（2006）は、ガリレイが自身の運動論を展開していく過程で「天秤の釣り合い」「斜面の運動」「振り子の運動」とのアナロジーを使用していたことを、次のように述べている⁶⁹⁾。

ガリレオの卓越していた点は、釣り合い状態にある錘の一方にわずかに重さを加え、それらが仮想的に変異する状況を想定することで、平衡状態からずれる運動を考察し、その運動が

斜面の運動に類似していることを見てとったことである。そして斜面の運動は、「抑制された自由落下運動」と捉えられた。つまり、斜面の運動も鉛直落下運動も本質的には同じ運動と捉えられたということである。また、振り子の運動も腕の折れ曲がった天秤とのアナロジーで捉えられた。

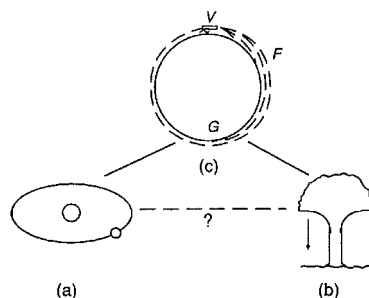


図12. ニュートンによる橋渡しを経てのアナロジーの評価⁶⁷⁾

高橋（2006）は、ガリレオのアナロジーの使用について、研究対象の「拡張」と表現しているが、本質的な部分を保存しながら表面的な部分を変化させているという意味では、クレメント（2008）の言う「変形」である。また、ガリレオの力学研究史を分析したライシス（Raisis, V., 1999）によると、その研究過程には、ある事例（モデル）の極限状態を取ることで新しい事例（モデル）を生成・評価していくという「変形」も見られる⁷⁰⁾。これはマクスウェルの事例にも見られた極限事例の導入である。さらには、「仮想的に変異する状況を想定する」ことを行っている点では、アナロジーであると同時に思考実験でもある。

ここまで限られた科学者（熟達者）の事例を検討してきたに過ぎないものの、アナロジー的モデリング、思考実験、視覚的モデリングなどの複合的な活用や、アナロジーの生成・評価方法という点では、科学者（熟達者）のアナロジーの使用方法には、一定の共通性を想定してもよいと言えるであろう。

6. おわりに

本稿では、理科教育におけるアナロジーによる教授法開発を念頭に置いて、多様なアプローチによって明らかにされてきた科学領域の熟達者のアナロジー使用に関する知見を検討・整理した。具体的には、心理学的アプローチ（実験室研究、現場研究）、科学史のアプローチ、科学哲学的アプローチという各種研究方法論の立場から調査・分析がなされ、一定の研究成果の蓄積が認められる代表的なものに着目して文献調査を行った。

アナロジーの目的・機能、アナロジーの生成、アナロジーの評価、アナロジーの内容領域、アナロジー使用とその環境の5つの観点から、そこで見出された知見を整理・統合すれば、科学領域の熟達者のアナロジーは、表2のように特徴付けられる。すなわち、科学者は、科学的な探究の過程や問題解決の過程において、自発的にアナロジーを使用し、問題の解決や状況の

改善を試みようとしていた。そして、そのアナロジーの使用の過程は、力動的でありアナロジーの生成・評価・修正の過程が一体的に遂行されていた。さらには、思考実験などの他の思考様式との併用が見られるなど、動的な活用過程であった。

表2. 科学領域の熟達者のアナロジーの使用の特性

観 点	特 性
科学領域での熟達	<ul style="list-style-type: none"> ・一定水準の理科学習課程を修了している。 ・日常的に、自律的な研究活動を遂行している。 ・科学的な知識が豊富であり、構造化されている。
アナロジーの目的・機能	<ul style="list-style-type: none"> ・問題解決の方法として使用している。 ・科学的な探究の方法（仮説設定、実験企画、理論構築など）として使用している。 ・研究グループ間での科学的な知識の伝達や意見の異なる他者の説得の方法として使用している。
アナロジーの生成	<ul style="list-style-type: none"> ・問題解決／科学的な探究過程で自発的に生成している。 ・状況に応じて、多様な生成様式（連想・変形・原理）が見られる。
アナロジーの評価	<ul style="list-style-type: none"> ・動的な認知的操作として多様な評価様式（写像・橋渡し・変形・シミュレーション）を活用している。 ・生成のみならず、評価に重点が置かれている。
アナロジーの内容領域	<ul style="list-style-type: none"> ・ターゲットに近い領域からベースが選択される傾向にある。
アナロジー使用とその環境	<ul style="list-style-type: none"> ・アナロジー使用は、生成・評価・修正という動的過程である。 ・他の思考様式（思考実験）と共起・併用されることがある。 ・科学的な探究過程で生成されたアナロジーは、記憶に残りにくい。

引用文献および註

- 1) Clement, J., "Using Bridging Analogies and Anchoring Intuitions to Deal with Student's Preconceptions in Physics", *Journal of Research in Science Teaching*, 30(10), pp.1241-1257, 1993.
- 2) Chi, M. T. H., "Two Approaches to the Study of Experts' Characteristics", in Ericsson, K., Charness, N., Feltovich, P.J., Hoffman, R.R. (eds.), *The Cambridge Handbook of Expertise and Expert Performance*, pp.21-30, 2006, Cambridge University Press.
- 3) Clement, J., *Creative Model Construction in Scientists and Students; The Role of Imagery, Analogy, and Mental Simulation*, 2008, Springer.
- 4) Clement, J. (2008), *ibid*, p.436.
- 5) Clement, J. (2008), *op.cit.* 3), pp.29-30.
- 6) Gentner, D., "Structure-Mapping : A Theoretical Framework for Analogy", *Cognitive Science*, 7, pp.155-170, 1983.
- 7) Clement, J. (2008), *op.cit.* 3), pp.537-538.

- 8) Clement, J., "Analogical Reasoning Patterns in Expert Problem Solving", *Proceedings of the Fourth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 4, pp.79-81, 1982.
- 9) Clement, J., "Observed Methods for Generating Analogies in Scientific Problem Solving", *Cognitive Science*, 12, pp.563-586, 1988.
- 10) Clement, J. (2008), *op.cit.* 3), p.26.
- 11) Clement, J. (2008), *op.cit.* 3), p.37.
- 12) Clement, J. (2008), *op.cit.* 3), p.38に基づいて筆者が翻訳・作成したものである。
- 13) 鈴木宏昭, 『類似と思考』, 84-88頁, 1996, 共立出版。
- 14) 鈴木 (1996), 前掲書12), 86頁に基づいて筆者が作成したものである。
- 15) 鈴木 (1996), 同上書, 90頁。
- 16) Clement, J. (2008), *op.cit.* 3), pp.39-40.
- 17) Clement, J. (2008), *op.cit.* 3), pp.39-40.
- 18) Clement, J. (2008), *op.cit.* 3), pp.38-39.
- 19) Clement, J. (1988), *op.cit.* 9), p.579.
- 20) Clement, J. (2008), *op.cit.* 3), p.38に基づいて筆者が翻訳・作成したものである。
- 21) Clement, J. (2008), *op.cit.* 3), p.38に基づいて筆者が翻訳・作成したものである。
- 22) Clement, J., "Expert Novice Similarities and Instruction Using Analogies", *International Journal of Science Education*, 20(10), pp.1271-1286, 1998.
- 23) Clement, J., "Imagistic Processes in Analogical Reasoning: Conserving Transformations and Dual Simulations", in Forbus, K., Gentner, D., Regier, T. (eds.), *Proceedings of the Twenty-sixth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 26, pp.233-238, 2004.
- 24) Clement, J. (2008), *op.cit.* 3), p.50に基づいて筆者が翻訳・作成したものである。
- 25) 車輪の問題 (事例 A) から, てこの問題 (事例 B) を考え出していることそれ自体は, 変形を経てのアナロジーの生成に相当すると思われるが, クレメント (1998) ではそのような見解は明確に示されていない。
- 26) Clement, J. (2008), *op.cit.* 3), p.304に基づいて筆者が翻訳・作成したものである。
- 27) National Research Council, *How People Learn; Brain, Mind, Experience, and School*, pp.48-50, 2000, National Academy Press (邦訳書: 森敏昭・秋田喜代美 (監訳), 『授業を変える - 認知心理学のさらなる挑戦 -』, 47-49頁, 2002, 北大路書房)。
- 28) Holyoak, K.J., Thagard, P., *Mental Leaps: Analogy in Creative Thought*, pp.185-189, 1994, The MIT Press (邦訳書: 鈴木宏昭, 河原哲雄 (監訳), 『アナロジーの力 - 認知科学の新しい探究 -』, 307-315頁, 1998, 新曜社)。
- 29) Holyoak, K.J., Thagard, P. (1994), *ibid*, pp.12-13 (邦訳書: 23-24頁)。
- 30) Dunbar, K., Blanchette, I., "The In Vivo/In Vitro Approach to Cognition: the Case of Analogy", *TRENDS in Cognitive Sciences*, 5(8), pp.334-339, 2001.

- 31) Dunbar, K., "How Scientists Really Reason: Scientific Reasoning in Real-world Laboratories", in Sternberg, R.J., Davidson, J.E. (eds.), *Nature of Insight*, pp.365-395, 1995, MIT Press.
- 32) Dunbar, K. (1995), *ibid*, pp.381-383.
- 33) Dunbar, K., "How Scientists Think: On-Line Creativity and Conceptual Change in Science", in Thomas B.W., Steven M.S., Jyotsna V. (eds.), *Creative Thought; an investigation of conceptual structures and processes*, pp.461-493, 1997, American Psychological Association (邦訳論文; 山崎治 (訳), 「科学者の思考法－科学におけるオンラインの創造性と概念変化－」, 岡田猛, 田村均, 戸田山和久, 三輪和久 (編著), 『科学を考える－人工知能からカルチュラル・スタディーズまで14の視点－』, 26-55頁, 1999, 北大路書房).
- 34) Dunbar, K. (1997), *ibid*, p.472 (邦訳論文; 36頁). なお, ここでの「実験の改善」とは, 科学者がある実験を行い, 予定どおりの結果が得られなかったときに, 当該実験の手続きの一部を以前行った類似の実験のそれに置き換えることを指している。
- 35) Dunbar, K. (1997), *op.cit.* 33), p.473 (邦訳論文; 36頁) に基づいて筆者が翻訳の上, 加筆作成したものである。
- 36) Dunbar, K. (1995), *op.cit.* 31), pp.383-384.
- 37) Kaufman, D.R., Patel, V.L., Magder, S.A., "The Explanatory Role of Spontaneously Generated Analogies in Reasoning about Physiological Concepts", *International Journal of Science Education*, 18(3), pp.369-386, 1996.
- 38) Dunbar, K. (1995), *op.cit.* 31), pp.385-386.
- 39) 植田一博, 「科学者の類推による発見」, 『人工知能学会誌』, 15(4), 608-617頁, 2000。植田は, 科学者が使用するアナロジーでのベースとターゲットとの距離は, そのアナロジー使用の目的に応じて変化するために, 単純に議論できないとする。
- 40) Dunbar, K. (1997), *op.cit.* 33), pp.474-476 (邦訳論文; 37-39頁)。
- 41) Dunbar, K. (1995), *op.cit.* 31), pp.384-385.
- 42) Dunbar, K. (1997), *op.cit.* 33), pp.476-477 (邦訳論文; 39-40頁)。
- 43) Nersessian, N. J., "How Do Scientists Think?: Capturing the Dynamics of Conceptual Change in Science", in Giere, R.N.(ed.), *Minnesota Studies in the Philosophy of Science XV*, pp.3-44, 1992, University of Minnesota Press がある。なお, ネルシエシヤンは, 自身の研究アプローチを「認知的歴史的 (cognitive-historical)」アプローチと呼んでいる。
- 44) E. セグレ (著), 久保亮五, 矢崎裕二 (訳), 『古典物理学を作った人ターガリレオからマクスウェルまで—』, 208-241頁, 1992, みすず書房。
- 45) 例えば, P.M. ハーマン (著), 杉山滋郎 (訳), 『物理学の誕生—エネルギー・力・物質の概念の発達史—』, 93-108頁, 1991, 朝倉書店。
- 46) V.P. カルツェフ (著), 早川光雄, 金田一真澄 (訳), 『マクスウェルの生涯—電気文明の

- 扉を開いた天才—』, 135頁, 1976, 東京書籍。
- 47) Maxwell, J.C., “On Physical Lines of Force”, in Niven, E.D.(ed.), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Vol. 1, p.489, 1965.
- 48) マクスウェルによる渦とのアナロジーと電磁気学的な意味については, 例えば, 竹内薫, 『「場」とはなんだろう—なにもないのに波が伝わる不思議—』, 31-62頁, 2000, 講談社に解説が見られる。
- 49) Nersessian, N. J., “The Cognitive Basis of Model-based Reasoning in Science”, in Carruthers, P., Stich, S., Siegal, M.(eds.), *The Cognitive Basis of Science*, pp.133-153, 2002, Cambridge University Press.
- 50) Nersessian, N. J. (2002), *ibid*, p.137.
- 51) Nersessian, N. J., *Creating Scientific Concepts*, p.57, 2008, The MIT Press. ここでは, 図9と類似した図が, マクスウェルのモデル化の過程として示されている。
- 52) Nersessian, N. J. (2002), *op.cit.* 49), p.152.
- 53) Nersessian, N. J. (2002), *op.cit.* 49), pp.151-153.
- 54) E. マッハ (著), 廣松渉 (編訳), 『認識の分析』, 111頁, 2002, 法政大学出版局。
- 55) Nersessian, N. J. (2008), *op.cit.* 51), pp.35-36.
- 56) Maxwell, J.C., (1965), *op.cit.* 47), p.489.
- 57) Nersessian, N. J. (2008), *op.cit.* 51), p.36.
- 58) K. R. ポパー (著), 大内義一, 森博 (訳), 『科学的発見の論理(下)』, 543-545頁, 1972, 恒星社厚生閣。なお, ポパーは, 思考実験の使用法として, 批判的使用 (critical use), 発見的使用 (heuristic use), 弁護的使用 (apologetic use) を挙げており, 思考実験を使用することが妥当である条件や弁護的使用の問題点を指摘している。
- 59) Hesse, M.B., *Models and Analogies in Science*, 1966, University of Notre Dame Press (邦訳書: 高田紀代志 (訳), 『科学・モデル・アナロジー』, 8-11頁, 1986, 培風館)。
- 60) Nersessian, N. J. (2002), *op.cit.* 49), pp.136-138.
- 61) Nersessian, N. J. (2008), *op.cit.* 51), p.134. 同様に, オリオーク=サガード (1994) も, ニュートンのアナロジーは, 思考実験であると指摘している。Holyoak, K.J., Thagard, P. (1994), *op.cit.* 28), p.193.
- 62) G. ガリレイ (著), 青木靖三 (訳), 『天文対話 (上)』, 193頁, 1959, 岩波書店。
- 63) G. ガリレイ (著), 同上書, 221頁。
- 64) Newton, I. (1687), in Nersessian, N. J. (2008), *op.cit.* 51), p.134.
- 65) Brown, J.R., *The Laboratory of the Mind; Thought Experiments in the Natural Sciences*(2nd edition), pp.5-7, 2011, Routledge.
- 66) Clement, J.(2008), *op.cit.* 3), p.55.
- 67) Clement, J.(2008), *op.cit.* 3), p.56.

- 68) Clement, J.(2008), *op.cit.* 3), p.54. なお, ここでクレメント (2008) が例に挙げているのは, ガリレイが『新科学対話』が使用したアナロジーで, ベネデッティが考えたとされたアナロジーである。
- 69) 高橋憲一, 『ガリレオの迷宮 - 自然は数学の言語で書かれているか? -』, 456頁, 2006, 共立出版。
- 70) Rasis, V., “Expansion and Justification of models: the Exemplary Case of Galileo Galilei”, in Magnani, L., Nersessian, N.J., Thagard, P.(eds.), *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery*, pp.149-164, 1999, Kluwer Academic/Plenum Publishers.