



Title	理科サークルにおけるオンライン掲示板を利用した研究活動と科学的説明の構築
Author(s)	大野, 栄三
Citation	北海道大学大学院教育学研究院紀要, 140, 353-376
Issue Date	2022-06-25
DOI	https://doi.org/10.14943/b.edu.140.353
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/86270
Type	departmental bulletin paper
File Information	18-1882-1669-140.pdf



理科サークルにおけるオンライン掲示板を利用した 研究活動と科学的説明の構築

大 野 栄 三*

【目次】

- 1 序論
 - 2 実践コミュニティとしての理科サークル
 - 2.1 メーリングリスト（ML）上のやり取りの分析
 - 2.2 問題解決とオンライン掲示板
 - 3 オンライン掲示板上のやり取りを分析するための理論的道具立て
 - 3.1 最良の説明への推論（IBE）
 - 3.2 最良の推論のための説明行為（EBI）
 - 3.3 「不良な一群の中での最良」の回避
 - 3.4 証言
 - 4 科学的説明の理論
 - 4.1 演繹的-法則的モデル（D-Nモデル）
 - 4.2 因果の説明と非因果の説明
 - 4.3 説明に役立つ統合と論証パターン
 - 5 結果と考察——オンライン掲示板上でおこなわれた問題解決の2つの事例
 - 5.1 事例1：「パピルス紙作製と褐色化の問題」
 - 5.1.1 事例1のオンライン掲示板での議論
 - 5.1.2 事例1の推論構造の分析と考察
 - 5.2 事例2：「水中の電球の見え方」
 - 5.2.1 事例2のオンライン掲示板での議論
 - 5.2.2 事例2の推論構造の分析と考察
 - 5.3 理科教師が納得する科学的説明
 - 6 結論
- 文献と註
- 【キーワード】 実践コミュニティ, 問題解決, 探究活動, 研修

1 序論

社会のさまざまな活動が、新型コロナウイルス感染症拡大のためにオンライン上でおこなわざるを得ない状況が起きた。理科教師のサークル活動（理科サークル）も同じであった。しかし、理科サークルにおけるオンライン上の研究活動は、コロナ禍以前にも活発であった。学校の理科実験室などに集まって対面で開催される例会を補完するものとして、メーリングリスト

* 北海道大学大学院教育学研究院

などのオンライン・ツールを活用した研究交流がおこなわれていた。本論文は、オンライン掲示板でおこなわれた理科サークルの研究活動を考察したものである。分析対象の活動は二十年近く前のものだが、教師の多忙化や少子化による学校規模縮小で理科教師が集まって自主的に研修をおこなうこと、サークル活動を継続することが難しくなっている今、過去のデータを使って理科サークルの研究活動を検討する意義はあると考える。

理科教師や大学教職員によって構成された理科サークルは実践コミュニティ (Community of Practice) であると考えることができる。実践コミュニティとは、エティエンヌ・ウェンガーが提唱した実践共同体の概念である¹。ウェンガーらの著作の記述²を借りて表現すれば、理科サークルとは、理科教育に関する関心や問題、熱意などを共有し、理科教育についての知識や技能を、持続的な相互交流を通じて深めていく教師の集団、実践コミュニティである。理科サークルのどれかが授業を実践する中でなにかの問題に遭遇すると、その問題は理科サークルで共有され、皆で解決しようと情報交換や議論が始まる。

本論文では、理科サークルの構成員によるオンライン上での問題解決活動を、科学的説明が構築されていく過程に着目して分析した。哲学者カール・ヘンベルは自然科学における説明という行為は、「大多数の場合には、説明を達成するということは、説明されるべき現象はすでに得られている法則と特定の事実についてのすでに得られているデータを用いれば説明できるということ、そして正確にはいかに説明できるのかということ、を示すことにあるのである」と述べている³。理科サークルで見られる問題解決の多くは、新しい法則や知見を発見するという活動ではない。理科サークルのひとりの構成員が説明できない現象に遭遇し疑問をもつ。それは理科サークルで共有され、説明しようとする活動が始まる。他の構成員からは、説明に使えるような既知の法則や事実が提案され、それらを利用して科学的説明が達成できるのかが検討されるといった具合の問題解決である。したがって、以下で検討する問題解決とは、目前で起きた事象に対して科学的説明を与えるという行為に限定される⁴。

理科授業で生徒が探究活動をおこなうとき、生徒は仮説を立て、それを検証する方法を考え、それを実施した結果から、自分たちの立てた仮説が検証されることを確認する。このとき生徒に、彼らが学んでいないことを発見するよう要求し過ぎると、探究活動は不満足な結果に終わってしまうだろう。なぜなら、発見という行為は簡単なことではないからである。むしろ、生徒がすでに学んだ知識を使って、目の前の現象に対して科学的説明を自分たちで達成できるかどうかに着目した方がよい。理科教育における探究活動は、科学的説明を自分たちで構築することに軸足をおく方が教育効果は高いのではないか。この言説を吟味するには、まずもって理科教師がおこなう探究活動自体が科学的説明を達成する活動になっているのかどうかを確認する必要がある。なぜなら、理科教師が科学的説明の構築という活動を経験したことがないのであれば、同じことを授業で生徒に実践させることはできないし、ましてやその結果を評価することはさらに無理な注文だからである。

本論文の構成は以下である。第2節で、ある理科サークルが使っていたメーリングリスト (ML) とオンライン掲示板で展開されたやり取りの量的分析を紹介し、理科サークルは継続した相互交流を続ける実践コミュニティであることを述べる。本研究では、このオンライン掲示板で展開されていた問題解決のやり取りを分析した。第3節では、認識論や実験心理学の知見から借用した理論的道具について述べる。これらは、オンライン掲示板で展開される理科教師たちの議論全体の推論構造を検討するための道具立てとなる。第4節で、いくつかの科学的

説明の理論を紹介する。理科教師たちの議論によって構築された科学的説明の論理的構造を捉えるために、科学的説明がもつ特質について整理しておく。第5節で、理科サークルのオンライン掲示板でおこなわれた問題解決の事例を2つ紹介し、それぞれに対して第3節で述べた理論的道具立て、第4節で紹介した科学的説明の理論を使って検討した結果を報告する。第6節で結論を述べ、今後の課題について論じた。

2 実践コミュニティとしての理科サークル

実践コミュニティとは、共通の専門性や、ある特定の事業に熱意をもって、献身的に関わる人々が非公式に結びついた実践集団である⁵。本論文では、教師や大学教員によって構成された教師のサークル活動を実践コミュニティの活動と捉える。地域のいくつかの学校に勤務する理科教師が自主的に集まり、実践コミュニティを形成したのが理科サークルである。理科サークルでは、いろいろな学校に勤務する若手からベテランの理科教師が、話題を持ち寄り情報交換し、問題の解決を通して知識や技能を共有していく。

ひとつの学校をひとつの組織と考えたとき、全校教師からなる集団、同じ教科を担当する教師からなる集団など、組織内にさまざまな集団を形成し、授業や学校運営を改善していくことになる。しかし近年は、少子化による学校規模縮小によって、理科を担当する、もしくは理科を得意とする教師が校内にひとりしかいないという事態が発生し、ひとつの学校内で理科教師の集団を思い通りに形成できないという問題が起きている。理科サークルのような、各学校の組織図内には存在しない地域の実践コミュニティが必要とされている。しかしながら、若手教師の多忙化や管理強化、サークルの活動を支えていたベテラン教師の退職などによって、教師のサークルが活動を続けることは年々難しくなっている。

本研究の対象である理科サークルは、毎月の例会だけでなく、MLとオンライン掲示板⁶も使って研究活動のやり取りをおこなっていた。このオンライン掲示板には、文書、画像、動画などさまざまな形式のファイルをメッセージに添付して投稿できる機能があり、それを利用して研究成果の報告や議論がなされた。第2.1節では、理科サークルが使っていたML上のやり取りを量的に分析し、サークル構成員の役割や関係性について考察した筆者の過去の研究について簡単に紹介する。次に第2.2節で、オンライン掲示板上ででのやり取りの量について述べる。

2.1 メーリングリスト（ML）上のやり取りの分析

研究対象の理科サークルでは、複数の近隣自治体の学校から、理科に興味をもつ小学校教員、中学と高校の理科教員、大学の教職員が月に一度、中学校理科室に集まり例会を開催していた。そして、例会の間のやり取りは、MLとオンライン掲示板を使っておこなわれていた。筆者の先行研究では、理科サークルが使っているMLでのやり取りに着目し、その流量等を調査した。ひと月あたり500～1000通になるMLに発出されるメールを社会ネットワーク分析し、その結果から、理科サークルの構成員（理科教師や大学教職員）の役割や問題解決に至る過程について考察した⁷。各構成員の送受信数に着目した数量的な解析であった。

図1は、ML上のやり取りをダイグラフによって表現した結果の一例である。グラフの20個

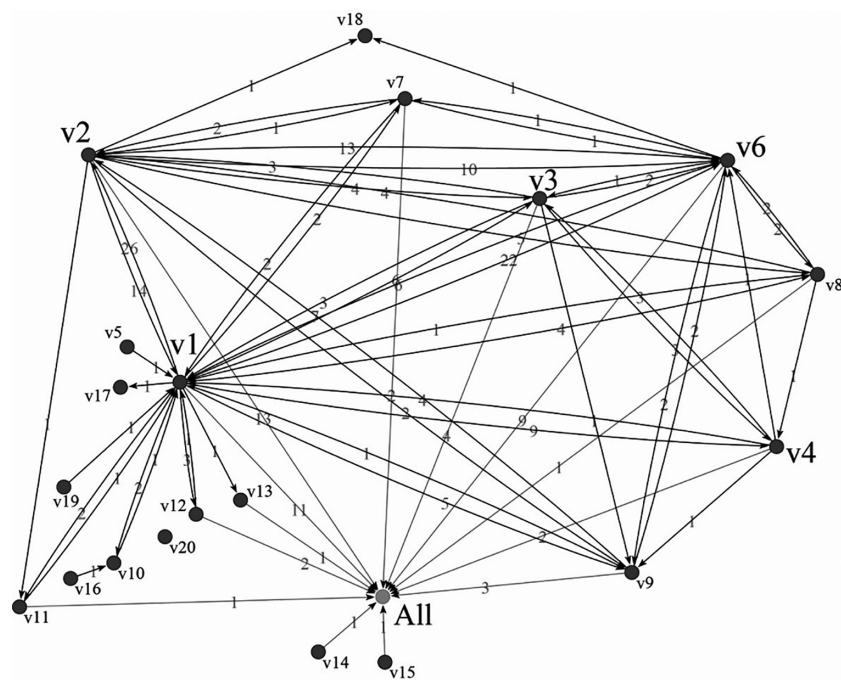


図1　メーリングリストでのやり取りを示すダイグラフの一例（文献7より）

の節（node）v1からv20は20名の理科サークル構成員を表している。ある構成員が全員へ向けてメールを送ったときには、その構成員から節Allへ矢印でつないでいる。グラフの数学的構造から彼らの役割を考察した。グラフの各節の入次数（indegree）、出次数（outdegree）、媒介値（betweenness）を使って、v1からv20の構成員を3つのクラスターに分けたのが表1である⁸。表には、各クラスターの次数の平均値を示している。クラスター1はv1のみで構成されており、v1は理科サークルの運営に関わる連絡をMLで行い、中心的な接続の役割を担っていた。クラスター2の構成員は議論に積極的に関わっており、クラスター3の構成員は傍聴していた。このように、MLでのやり取りを表す社会ネットワークの分析から、構成員の属性や活動への貢献の仕方について考察することができた。

表1　ネットワーク解析の結果（文献7より）

クラスター	構成員	入次数（indegree）	出次数（outdegree）	媒介値（betweenness）
1	v1	0.63	0.63	0.33
2	v2, v3, v4, v6, v7, v8, v9	0.23	0.26	0.01
3	v5, v10～v20	0.04	0.03	0.00

2.2 問題解決とオンライン掲示板

本研究では、上述のMLでのやり取りと同時期に、オンライン掲示板でもおこなわれていた問題解決の議論を分析した。MLでは、会話に近い、気軽な意見交換が頻繁におこなわれるが、

オンライン掲示板では、写真、図表、グラフなどとともにメッセージが投稿され、MLに比べて、ある程度まとまった内容の意見がやり取りされていた。理科サークルのオンライン掲示板は、構成員がさまざまな形態のコンテンツを共有し、問題解決について議論をおこなう場であった。

本論文では、MLとオンライン掲示板で議論された2つの問題、「パピルス紙作製と褐色化の問題」と「水中の電球の見え方」を取り上げて、そこで展開されたやり取りの推論構造を科学的説明の構築という観点から分析する。「パピルス紙作製と褐色化の問題」は、ある教育機関の温室で栽培されているパピルスからパピルス紙を作製したところ、パピルス紙が褐色化してしまうという問題を解決するやり取りであった。褐色化はどのような化学反応なのか、褐色化を防ぐ方法はあるのかが問題となり議論が展開された。「水中の電球の見え方」の問題は、白色の白熱電球（シリカ電球）を水中に沈めた時、白い部分が内部に縮んだように見える現象を説明しようとする光学の議論であった。

問題解決の活動はMLとオンライン掲示板で同時におこなわれていた。図2は、表1のクラスター1とクラスター2に属するサークル構成員 v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_6 が、MLとオンライン掲示板にどのような割合で先の2つの問題解決に関わるメッセージを書き込んだのかを示したグラフである⁹。

サークル構成員によってMLとオンライン掲示板を使う割合に多少の違いはあるが、むしろ議論されている問題による違いの方が大きい。MLでは、問題解決のやり取りだけでなく、毎月の例会でのさまざまな話題についても議論がおこなわれており、それらの電子メールと一緒に先の2つの問題に関係した実験の進捗状況などが報告されたりもした。「パピルス紙作製と褐色化の問題」では、褐色化の実験の途中経過をMLへのメッセージ中に書き込み、結果がある程度まとまったところでオンライン掲示板に報告するという流れであった。一方、「水中の電球の見え方」の問題では、光学理論による作図や実験結果の写真を使った説明が多く、MLへのメッセージよりも、オンライン掲示板を使った報告が多かった。このような傾向があったため、問題の違いによってメッセージ数の割合も異なるという図2の結果になったと思われる。

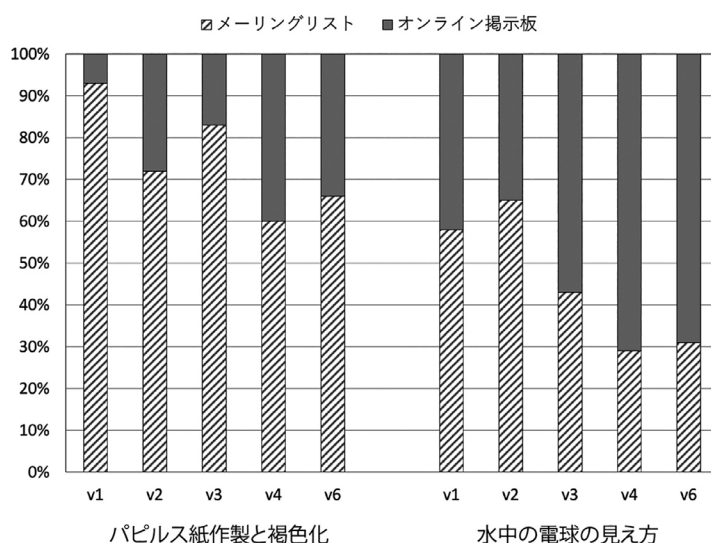


図2 メッセージ量の比較（文献9より）

3 オンライン掲示板のやり取りを分析するための理論的道具立て

理科サークルの複数の構成員がオンライン掲示板で展開する議論の構造を分析するための理論的道具立てを本節で述べる。問題解決の活動全体は、オンライン掲示板のやり取りだけでなく、毎月の例会、日々のメーリングリストでのやり取り、個人の活動をすべて合わせたものである。そうした活動の途上で得た実験結果や仮説を投稿し、理科サークル全体でそれらを共有していく場所がオンライン掲示板であった。問題解決の活動全体を海に一例に並んだ多数の氷塊にたとえるなら、オンライン掲示板への投稿は多数の氷塊の海面上に見えている部分であり、例会やメーリングリストなどのその他の活動は氷塊の海面下の部分になる。オンライン掲示板への一連の投稿は、いわば氷山の一角の連なりである。対面でおこなわれる討論の場合は、発言の間にある種の修辭的關係 (rhetorical relation) を設定して、討論全体の談話構造を検討することができるだろう。しかし、氷山の一角が連なるオンライン掲示板には、共通の問題を解決するという一貫した文脈はあるものの、投稿間に緊密な關係を設定するのは難しい。そこで本研究では、最良の科学的説明を達成する際の推論構造が、オンライン掲示板への一連の投稿にどのように反映されているかを考察することにした¹⁰。

科学的説明の達成までにオンライン掲示板で展開されたやり取りの全体が、いくつかの推論構造と關係するとみなし、どのような論理構造をもつのかを解釈することが本研究のねらいである。そのために、認識論の「最良の説明への推論」(Inference to the Best Explanation: IBE)¹¹と証言 (testimony)¹²、そして、実験心理学の結果を基に提案されている「最良の推論のための説明行為」(Explaining for the Best Inference: EBI)¹³を使う。これら道具立ては説明一般についての理論であり、科学的説明に限定されるものではない。科学的説明の理論については第4節で述べる。

3.1 最良の説明への推論 (IBE)

オンライン掲示板でおこなわれた問題解決のやり取りを、理科教師たちが実験事実を説明するために仮説をいくつも提案し、それらを評価していく推論過程だと考え、IBEを使って考察する。IBEは、認識論で提案されている推論のモデルである¹⁴。科学哲学の分野では、現象の理解、仮説 (仮の説明)、理論の理解をつなぐ推論のモデルとして議論されている^{15, 16}。

IBEの一般的構造は以下になる¹⁷。

$F_1, F_2, \dots, F_n$ は説明を要する事象である。

仮説Hは F_i を説明する。

Hはどうか F_i を説明できる対立仮説が他にはない。

(1)

したがって、Hは真である。

事象 F_i ($i=1, \dots, n$) は、説明が必要で明らかにしなければならない事態や状況である。仮説Hが真なら、つまりHが最良の説明であるなら、 F_i はHのエビデンスとなる。歴史的には、上記構造における推論の役割は主としてHの発見にあるとされ、アブダクションと呼ばれてきた¹⁸。しかし、推論の役割がHの発見ではなく、特定のHを正当化すること、多数の仮説から

最良の説明となるHを選ぶことにある場合、推論構造 (1) は、アブダクションではなくIBEとなる¹⁹。

この推論構造 (1) を我々は日常生活で、科学とは関係のない事柄について説明するために使っている²⁰。したがって、IBE自体を実行することに、科学者特有の高い専門的スキルが要求されるわけではない。IBEで問題となるのは、「うまく説明できる」にある「うまく」の意味である。つまり、仮設Hによる説明がもつどのような長所から、特定のひとつの説明を最良であると判断するのかが問題になる。認識論の議論では、可能性(likeliness)や魅力(loveliness)という概念が使われる²¹。科学の文脈でIBEが議論されるときには、科学的説明がもつ長所について、わかりやすさ (simplicity)、説明力 (説明範囲の広さ)、場当たりのでなさ (non ad hocness)、反証可能性などの判断基準が、科学特有の意味内容をもって登場する²²。こうした判断基準は、科学的説明とは何かという問題、つまり科学的説明の理論と関係する。さらに、それらの判断基準は、優れた科学的説明がもつとされる長所を述べており、科学とは何かという問題、科学の本質 (nature of science: NOS) とも関係してくる²³。

3.2 最良の推論のための説明行為 (EBI)

IBEでは、推論の成果である説明自体がもつ価値に着目して、その説明に到達するまでの推論の有効性が議論される。つまり、最良の説明を得ることが目的である。それに対して、説明するという行為自体に着目するのがEBIである²⁴。就学前の子どもを対象にした実験で、実験過程の途中で説明するように促された子どもには、その後の問題解決の推論 (因果推論の実行) に系統的なプラスの影響が現れるという結果が得られている²⁵。それら実験結果を基にして、説明を試みるという行為は、たとえその内容が不完全であっても、そして説明行為で得られた説明が間違っていたとしても、その後の理解を深め、問題解決の助けになるという一般化された考え方が提案された。これがEBIである。説明するという行為には、その結果として得られた説明自体とは独立に価値があるというのがEBIである。EBIは過程 (説明行為) を、IBEは結果 (説明) を重視する。

IBEとEBIの両者は対立するものではない。理科の授業全体の展開がIBEとして解釈できるときに、EBIの過程がその中に含まれていると考えることができる場合がある。たとえば、仮説実験授業では、討論での子どもの発言を教師は邪魔しない。子どもの発言に含まれている説明行為を教師がその場で評価し、結果を子どもにフィードバックしない。誤答の選択肢を選び、討論でそれについて間違った説明を語っていたとしても、最後は、教師の直接的な介入なしに、正答の選択肢へと変更する子どもがいる。EBIの考え方に従うのなら、理にかなった指導である。理科サークルのオンライン掲示板上でおこなわれた科学的説明を達成する議論においても、その全体の推論構造はIBEで解釈できるが、その中にEBIの過程が含まれていた。

3.3 「不良な一群の中での最良」の回避

IBEに対する批判のひとつに「不良な一群の中での最良 (the Best of a Bad Lot)」がある²⁶。この仮説の方があの仮説よりも良さそうだと比較して判断し、ある仮説が最良だと信じているとしよう。仮説の集合 (有限な集合) の各要素を比較して最良の仮説を得るというIBEの推論では、最良の仮説がその集合の中に含まれていることがア・プリオリに要求されているという批判である。このア・プリオリな要求がなければ、IBEは、あまり役に立たない不良な

仮説の一群から、他よりは良さそうなものをなんとか一つ選んでいるだけの推論かもしれない。

理科サークルの議論の構造をIBEで解釈できたとしても、それが最善の説明を達成したことを約束しているわけではないことになる。「不良な一群の中での最良」批判に対して、認識論では反論がなされている。しかし、本研究では、それら反論の詳細は問題ではない。理科サークルの議論が「不良な一群の中での最良」を選ぶという事態になってしまう場合のあること、そして理科の授業においてもそうになってしまう場合のあることが問題なのである。

理科の授業で、子どもの自発的な活動を過度に重視し、彼らに自力で説明をつくらせるだけであったり、いくつもの仮説を発案させるだけであったりする授業、言い換えればアブダクション過剰の授業は、戦後のはいまわる生活単元・問題解決学習から昨今のかたちだけのアクティブ・ラーニングまで、学校教育の中で何度も繰り返されてきたことである。そして、授業が失敗した後に得られたものは、「不良な一群」であった。その一群から最良のものを選んでみたところで、たいして役には立たない。結局、子どもの自発的な活動をそれはそれとして認めつつも、なんとか残された授業時間内で最良の説明を教師が教え込むという事態になる。

「不良な一群の中での最良」を避けて、最良の説明へ到達できる理科授業をおこなうためには、教師がしっかりと授業プランをつくらなければならないのはもちろんのことである。しかし、さらにその前提として、科学の文脈でのIBEやEBIを、教師自身が何らかのかたちで経験し、実感していなければならないだろう。実践コミュニティである理科サークルにおける問題解決の活動では、理科教師から出される説明に、最初は不完全なものや誤りを含むものがある。そのような不完全な説明行為から、理科サークル内の議論によって最良の説明がつくられていく。理科サークルは、科学の文脈でのIBEやEBIを教師が実感できる場であると筆者は考えている。

3.4 証言

子どもが上述のIBEやEBIを意識して議論をなめらかに進めるのは難しい。大人であっても、議論している話題と彼らの専門性との相性が悪いとき、彼らの持っている知識が十分でないときには困難が伴うだろう。説明や推論のために必要な知識をどのように得るのが問題になる。日常生活の多くの場面では、説明や推論に必要な事実や法則、時と場合によってはそれらで構成される説明自体が、証言 (testimony) として提供され、それを使って、IBEの推論がおこなわれる。

子どもにとって、大人の証言はたいせつである。たとえば、子どもが到達した（その時点での）最良の説明が「pは真である」ということであったとしよう。そこで教師が言明pであると子どもに念押しすれば、教師の「pである」という証言に基づいて、「pである」と子どもが信じることは道理にかなっている。

科学者にとっては、たとえば学術雑誌に掲載された論文の内容は証言になる。先述の例で、「教師」を「論文」、「子ども」を「科学者」と置き換えて考えればよい。ある科学者が学術論文を読んで、その論文の主張する内容が自分の推論した結果（実際は、追試などの実験をおこなうこともあるだろう。それらを含めて）と同じなら、その論文の内容を最良の説明であると信じることは正当なことである。証言の正当化の問題や、証言が知識の源になるのかについて議論はあるが²⁷、本研究では、上述のような証言を使った推論という観点から、理科サークルの議論に登場した証言が、その後のやり取りにどのような影響を与えていたのかを考察する。

4 科学的説明の理論

本研究では、理科サークルのオンライン掲示板への投稿がもつ意味内容に着目し、説明構築の過程を第3節で述べた道具立てを使って分析していく。理科サークルが達成した科学的説明はどのような構成要素からつくられているのか、それらはオンライン掲示板上一連の投稿の中にどのようなかたちで登場してくるのかを検討する。そのためには、推論構造(1)にある仮説H、つまりIBEで達成される科学的説明とは何かを考えておかななくてはならない。

説明とは、「なぜですか」「どうしてですか」という問いかけに対する答えである。英語には、理由をいっきに尋ねる"Why is that?"や、問いかけの状況に至る過程に力点を置いた"How come?"といった問いかけがある。こうしたニュアンスの違いに対してどのように答えるかで説明にも違いが生まれる。そして、いろいろな説明がある中で、ある特質をもつものが科学的説明と呼ばれる。今のところ、科学的説明を単一のまとまった概念としてとらえ、一元的な説明理論を樹立する可能性は見通しが暗いと言われている²⁸。科学的説明の特質について、対立する理論がいくつも提案されている。そうした論争を解決することは本研究の目的ではない。本論文では、状況に応じて、いろいろな科学的説明の理論から役立ちそうなものを選択し、それを道具として使っていくという立場に立つ。

4.1 演繹的-法則的モデル(D-Nモデル)

科学的説明において、条件、現象、法則など、説明するために使われるものを説明項(explanans)と呼び、説明されるべき現象や法則を被説明項(explanandum)と呼ぶ。哲学者カール・ヘンペルは、説明項と被説明項がどのような関係にあるのかに注目し科学的説明の理論を展開した。演繹的-法則的モデル(Deductive-Nomologicalモデル:D-Nモデル)は、説明項(説明する命題)と被説明項(説明される命題)の間に演繹的關係があるとする科学的説明の理論である²⁹。ヘンペルのD-Nモデルを図式的にあらわすと以下になる。

$$\begin{array}{c} C_1, C_2, \dots, C_k \\ L_1, L_2, \dots, L_r \\ \hline \text{したがって, } E \end{array} \quad (2)$$

$\{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ は説明に必要な条件などの事象、 $\{L_1, L_2, \dots, L_r\}$ は説明を導出するために用いる法則や定義、Eが説明である。 $\{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ と $\{L_1, L_2, \dots, L_r\}$ が説明項、Eが被説明項になる。D-Nモデルでは、説明項の中に少なくともひとつは一般的、普遍的な法則が含まれていなければならない。図式(2)は、 $\{L_1, L_2, \dots, L_r\}$ を用いて、 $\{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ ならばEであることが演繹的に推論されることを表している。D-Nモデルでは、「近似的にのみそしてある条件つきでのみ成立することが理論の根拠にもとづいて知られているようなある種の命題」についても「法則」という言葉が使われる³⁰。たとえば、重力による自由落下を等加速度運動と近似したときの落下距離と時間の関係や振れ幅が小さいときの単振り子の周期と糸の長さの関係(後述の式(4))も法則に含めることになる。これらの関係がある条件のもとに成立することは力学理論にもとづいて知られていることである。

D-Nモデルの例として、実験室での測定結果から得られた自由落下運動の規則性を万有引力の法則によって説明する、単振り子の糸の長さを1 mにしたとき、その周期がいくらになるかを説明（予測）する、いくつかの物理法則とシミュレーションを使って大気中の二酸化炭素濃度増加が原因で地球が温暖化することを説明するなどがある。

単独の演繹的推論でつくられている図式（2）以外に、科学的説明の構造が被説明項Eにいたる演繹的推論の連鎖となっている場合がある。それを図式化すると以下になる。

$$\begin{array}{ccccccc}
 A_1 & & B_1, A_2 & & B_2, A_3 & & \dots & & B_{k-1}, A_k \\
 \hline L_1 & \nearrow & \hline L_2 & \nearrow & \hline L_3 & \nearrow & & & \hline L_k \\
 B_1 & & B_2 & & B_3 & & & & E
 \end{array} \quad (3)$$

図式（3）は、 B_{i-1} と A_i の連言が成立し、その連言を別の言葉で言いかえた事象 B_i が成立するという演繹的推論の連鎖である。このような演繹的推論の連鎖は、被説明項Eが発生する過程をたどっているので、発生的説明（genetic explanation）と呼ばれている³¹。

理科サークルのオンライン掲示板上で展開されているやり取りが、図式（3）のような演繹的推論の連鎖に従って、時間とともに変化していくわけではない。理科サークルが達成した科学的説明が、図式（3）の推論構造をもっているかどうかを問題にしている。すべての科学的説明がヘンペルのD-Nモデルに還元されるわけでもない。本研究では、ヘンペルのD-Nモデルにに制約があることは承知した上で、それを道具として使い、理科サークルによって達成された科学的説明が全体としてどのような推論構造をもっているのかを検討する。

4.2 因果的説明と非因果的説明

D-Nモデルの科学的説明で、連鎖していない単独の演繹的推論による説明は因果的説明か非因果的説明かのどちらかに分類される³²。事象Cと法則Lから被説明項Eが演繹的に推論されるとしよう。法則Lによって、CならばEであるという条件文が成立している。この条件文の前件であるCが後件であるEより時間的に先行する場合、法則Lは継時法則（law of succession）と呼ばれる。科学的説明で使われているLが継時法則で、かつ事象Cと法則Lについてはすでに説明されているか、説明を必要としないという条件が満たされているとき、その科学的説明は因果的説明となり、Cは原因（cause）、Eは結果（effect）と呼ばれる。力学の運動法則は継時法則である。たとえば、モンキーハンティングの実験では、初期条件Cで打ち出されたボールが時間の経過で位置を変えて標的にぶつかる結果Eになることが、運動法則Lによって説明される。

法則Lによって成立する条件文で、前件であるCと後件であるEが同時である場合、法則Lは同時法則（law of coexistence）と呼ばれる。因果的説明では、時間的に先行する原因が結果とどのようにつながるのかを継時法則を使って述べることで説明される。一方、同時法則による説明では、なぜCとEが同時に成立するのかという問いかけに対して、その理由を述べることによって答えることになる。これが非因果的説明である。

単振り子の糸の長さが l のとき、その周期が T になることを説明する場合、以下の式（4）で表される法則Lが使われる。

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (4)$$

私たちは糸の長さ l を自由に調整することができる。単振り子の糸の長さ l を決めると同時に、その周期 T は決まってしまう。逆に単振り子の周期 T がある値に決まれば、その糸の長さ l の値も決まってしまう。式 (4) は同時法則である。糸の長さ l_1 と周期 T_1 を式 (4) へ代入して成立していることを示し、条件 C (単振り子の糸の長さは l_1) ならば被説明項 E (単振り子の周期は T_1) であることを説明する。説明は演繹的であるが、因果的ではない。このように同時法則による説明は非因果的説明である。非因果的説明においても、因果的説明と同様、事象 C と同時法則 L はすでに説明されているか、説明を必要としないという条件が満たされていることが必要である。

4.3 説明に役立つ統合と論証パターン

ヘンペルの D-N モデルの他にも科学的説明の理論はあり、それらを道具に採用することで、議論の見え方や構造のとらえ方は異なる。哲学者フィリップ・キッチャーは、統合、統一が説明の実質であると考え、科学が提供するものは、個々の説明行為に使うための多数の無関係な論証 (argument) ではなく、説明の目的に合った役に立つ説得力ある妥当な論証であり、それらが統合、統一された論証パターン (argument pattern) の集合であるとした³³。論証パターンは、図式的論証 (schematic argument)、図式的論証中にあるダミーの文字を埋めるための代入指示 (filling instructions)、図式的論証の分類 (classification for the schematic argument) の 3 つから構成されている。以下の図式的論証 (5) は、ニュートン力学で使う論証パターンの例である。

- 図式的論証
 - 1) β は α にはたらく力
 - 2) α の加速度は γ である。
 - 3) 力 = 質量・加速度
 - 4) (α の質量)・ $\gamma = \beta$
 - 5) $\delta = \theta$
- 代入指示

α には物体を参照する表示を代入する。 β は物体の座標変数と時間の関数、 γ は物体の位置の時間微分、 δ は物体の座標変数、 θ は時間の関数である。
- 図式的論証の分類

1) から 3) は前提であり、4) は前提を使って所定の代入を実行することで成立する。5) は数学を使って 4) から導出できる。

この論証パターンを使うことで、さまざまな力学現象を説明することができる。多数の結論を導出して、多様な事象に説明を与えることのできる論証パターンは統合力、統一力があるとされる。

科学史上で対立する理論の間で選択がおこなわれたときには、この論証パターンの統合力、統一力が判断の決め手になったと考えるのがキッチャーの科学的説明の理論である³⁴。化合物

についての疑問「なぜXとYの化合物はいつもXとYの重量比が $m:n$ で化合するのか」に対して、19世紀化学の範囲内で説明する場合の論証パターンは以下になる。

- 図式的論証
 - 1) XとYの化合物Zがあり、その化学式は X_pY_q である。
 - 2) Xの原子量は x 、Yの原子量は y である。
 - 3) ZにおけるXとYの重量比は、 $px : qy (= m : n)$ である。
- 代入指示 (6)

X, Y, Zは化学物質の名称で置き換える。 p と q は自然数である。 x と y は実際の数値で置き換えられる。
- 図式的論証の分類
 - 1) と 2) は前提で、3) は 1) と 2) から導出される。

この化合物の重量比による論証パターン (6) は、その後、原子価の概念が提案されて図式的論証の 1) の理解が深まり、陽子、中性子、電子からなる原子構造によって図式的論証の 2) がより具体的になったことで、拡張されさらに統合力のあるものになったとキッチャーは論じている³⁵。

理科教育では、このようなパターンへの代入、埋め込みは丸暗記につながると批判されるのかもしれないが、生徒が科学的説明を納得する理由として、論証パターンの統合力、統一力を考慮することに意義はあると筆者は考えている。本論文では、理科サークルの構成員が自分たちの構築した科学的説明を納得し受け入れる状況を、説明に役立つ統合、論証パターンの統合力、統一力という観点から考察する。

5 結果と考察——オンライン掲示板上でおこなわれた問題解決の2つの事例

5.1 事例1：「パピルス紙作製と褐色化の問題」

ある教育機関の温室で栽培されているパピルスの茎を利用したパピルス紙作製で起きた疑問を解決する活動であった。パピルスの茎を薄く切り取ってつくった短冊を水洗し、縦横に交差させて織り圧着することでパピルス紙を作製したところ、時間の経過とともに茶褐色に変色していった。なぜこの変色は起きるのか。原因物質がパピルスに含まれているのか。褐色化の化学反応はどのようなものなのかが議論された。

5.1.1 事例1のオンライン掲示板での議論

オンライン掲示板上の議論は、12月中旬に開催されたサークル例会におけるパピルス紙作製の後に始まっている。以下は、この問題解決に向けての推論に関係する主要な投稿である。括弧 [] 内の番号はオンライン掲示板への投稿に付される通し番号である。番号の次の英字v2, v4, v6, v8はサークルの構成員で、表1のクラスター2に属している。括弧 () 内は筆者による投稿文の要約、括弧 < > は筆者による補足である。化学反応の議論の詳細は省略した。

- [144]v2 (Jan. 7): MLで予告しておきながら載せるのが遅くなりました。…すぐに圧搾したものが一番白くてきれいでした。しかし、硬くて押し潰しが悪く、乾燥すると短冊が縮んでそこから剥がれてしまいました。…茎断片を1ヶ月水に沈めておいたものは、中の髄は真っ白でしたが、それをスライスしてすぐ圧搾すると、作り途中で徐々に薄茶色になってきました。〈写真と一緒に投稿されている〉
- [145]v2 (Jan. 7): (スライスしたパピルスに0.9%食塩水、純粋、海水に3日間さらしたものを使って作製した結果の報告。すべて作製途中で茶色になる)
- [146]v8 (Jan. 9): …ミキサーで攪拌し、漂白した後、和紙のように漉いてはがき大になっています。…(漂白すると色はクリーム色できれい)
- [148]v2 (Jan. 10): (スライスしたパピルスの厚さと圧搾方法についてv8へ質問)
- [149]v8 (Jan. 13): (v2からの質問への回答)
- [150]v6 (Jan. 13): …パピルスの褐色化を防ぐ方法に関して…「リンゴ 褐色 酵素」で検索しました。…リンゴ、レタス、セロリの褐色変化はポリフェノール類…が酵素に触れると…でいったんキノン類という物質になったあとさらに反応…して褐色の物質になることによっておきます。…褐色になるのを防ぐには、(この後に続けて、1. 水につけて酵素を溶かす、2. 酵素作用を失活させるため高温を潜らせる、ビタミンCなどをでpHを下げる、3. 二酸化硫黄、亜硫酸ソーダ溶液に浸すという提案が書かれている。そして、ジャガイモが黒く変化する反応についても報告されている)
- [151]v6 (Jan. 13): (褐色物質はメラニンではないかという仮説を提案している。メラニンは水や有機溶剤に解けない。メラニンは外皮にあるポリフェノールと酸化酵素の反応でできる。) …ジャガイモが褐色になったりするのは植物の生体防御反応だっていうのも「へ-----」でした。…やはり、実験などで確かめられるといいなと思います。いくつかの果物や野菜とパピルスとを比べる以下のような実験を考えたんですけど。…Q₁: パピルスの色素変化は本当に酵素褐変なのか。Q₂: パピルスに含まれると思われるポリフェノールを確認できるか? …〈続けて、実験の説明が書かれている〉
- [153]v4 (Jan. 15): …パピルスの褐色化がメラニンであるかどうかは、まだはっきりしていないというところから出発しておいたほうが無難だと思っています。いずれにしても実験結果を楽しみにしています。〈v4は大学教員。植物関係が専門ではない〉
- [155]v6 (Jan. 16): …渋柿が甘くなるのは柿の水溶性のタンニンが不溶性になるためだと読んだことがあり、それが柿の実に紫色から褐色の点や筋になって残っているということのようなのですが。この不溶性タンニンがメラニンと同じ…ようなモノで、パピルスでもこれが怪しいと今は思っています。…また、接着成分もタンニンなどのポリフェノール類なのかなーとおもいめぐらせているのですが…。
- 〈これまでのやり取りの背景で、サークルの構成員がパピルス作製の試行錯誤を含めた実験結果をMLで紹介している〉
- [165]v6 (Jan. 18): (2日間パピルスの茎をレモン水に浸けた後、パピルス紙を作製した結果を報告。圧搾するとすぐに茶褐色に。圧搾のときにレモン水をふりかけると白いまま。アイロンで乾燥) 高校生物の酵素実験はカタラーゼを使って、最適pH、最適温度の確認をおこなうのが一般的ですが、パピルス作りはその応用としてもいい教材ですね。
- [167]v6 (Jan. 19): (緑茶に鉄イオンを入れて黒紫色になる結果を見せて、緑茶のカテキンはポリフェノール類で、ポリフェノールと鉄イオンの反応と紹介)
- [168]v2 (Jan. 19): (1月の例会でのレジュメを投稿。茶葉の発酵が、お茶ポリフェノールの酵素的褐変であることを紹介)
- [181]クラスター3の構成員 (Jan. 22): (1月の例会のレジュメを投稿。3つの実験結果を報告する。実験1:

水に浸けておく期間を1, 2, 3日の3条件, 実験2: 3日間, 水道水, 炭酸水, ビール, 酢に浸ける, 実験3: 圧搾を手, プレス機で比較。実験1はどれも褐色化し, 実験2は炭酸水, ビール, 酢の順番に白さが増し, ビールは圧搾したときの接着が良いという結果になった)

[185]v6 (Jan. 25): ポリフェノールと鉄イオンの反応を確かめる実験です。パイナップル, バナナ, 緑茶, 紅茶, レンコン, ゴボウ, パピルスと鉄イオンの反応です。…レンコンとパピルスの反応がよく似た感じがします。〈実験結果の写真投稿あり〉

[188]v6 (Jan.26): ○○大学の食物科学の※※先生にパピルスの経緯を書いた上で3つの質問をしました。…(質問1: 酵素褐変でできた褐色物質は何で, その構造は。回答1: 構造は不明。ポリフェノールのポリマー。リングなどでは, メラニンではなく, クロロゲン酸やカテキンが酸化された重合体。質問2: フェノールと鉄イオンの反応でできる物質の構造は。回答2: フェノールの水酸基と鉄がキレートしたものではないか。質問3: お茶や紅茶と鉄イオンの反応でできる物質は。回答3: カテキンなどの構造はわかっているが, 数量体以上のものの構造はよくわかっていない) …メラニンはチロシンが酸化されたものが重合…リングにはチロシンがない。ここからは予想ですがパピルスは反応がレンコンによく似ているような気がします。レンコンにはクロロゲン酸というポリフェノールが多いことがわかっています。したがって, パピルスもクロロゲン酸などの加水分解型ポリフェノールが重合してできたものではないか。だから, パピルスの褐色に変化した物質をメラニンと呼ぶのは無理がある気がする。〈○○大学の※※先生は理科サークルの構成員ではない〉

この投稿後に, ポリフェノール類と鉄イオンとの呈色反応を調べるさまざまな実験の結果が, 主にv2とv6によって投稿された。また, パピルスの短冊を1ヶ月天日干しにした効果, 茎を薄く剥がすのではなく桂剥きにした場合の結果などが, サークル構成員のv2, v8, その他の構成員から投稿され, 2月上旬まで議論は続いた。

5.1.2 事例1の推論構造の分析と考察

事例1では, 植物にポリフェノール類が含まれているときには化学反応によって植物が変色していくという因果的説明を使って, パピルス紙に起こった褐色化現象が説明されている。何が原因で, どのような過程で結果にいたるのかを明らかにしようとする活動がオンライン掲示板でおこなわれた。この節では, 第3節で紹介した理論的道具立てや第4節の科学的説明の理論を使って, オンライン掲示板上のやり取りを考察する。図3は, オンライン掲示板上のメッセージの展開に理論的道具立てをあてはめて解釈した結果である。時間は図の下から上へと経過している。

オンライン掲示板での議論が始まる前に, サークルの12月開催の例会において, パピルス紙作製時に褐色化が起こる事実, そして, それを防ぐためには変色の化学反応を明らかにしなければならないことはサークル構成員に共有されていた。これは, IBEの推論構造(1)の説明を要する事象 F_1 になる。ただし, 例会開催中に, IBEの推論が展開されたわけではなく, 解決困難な問題であったため, リングの褐色化の例が出されるなど着想や感想で終わっていた。

オンライン掲示板の[144]v2から[149]v8, そして遅れて投稿された[181]クラスター3の構成員において提供されたパピルス紙作製の結果は, 科学的説明の理論の図式(2)にある先行する事象 $\{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ というよりも, IBEの図式(1)にある説明を要する事象 $F_1, F_2, \dots, F_n$ の再確認や補足であると筆者は解釈した。事象 $F_1, F_2, \dots, F_n$ の確認や追加は, IBEの図式(1)

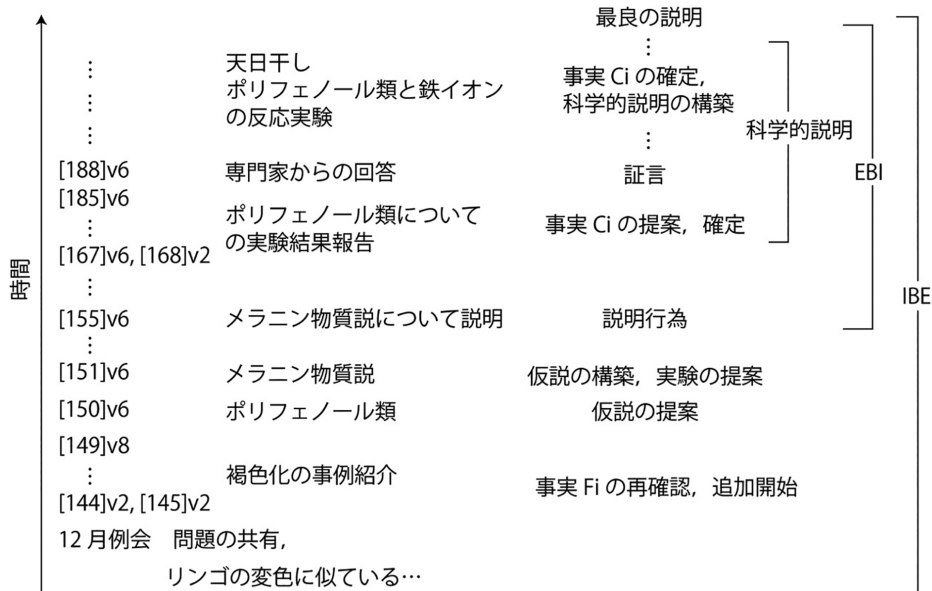


図3 事例1「パピルス紙作製と褐色化の問題」の推論構造

の仮説Hを吟味するための準備である。

サークルの12月の例会では、リンゴを放置しておくと同じ反応ではないかという着想が既に出ていた。v6はオンライン掲示板の[150]v6で、リンゴの反応から、パピルスに含まれるポリフェノールが酵素と反応して起きるという仮説を提案している。そして、[151]v6で褐色物質はメラニンであると推測し、それを検証して科学的説明を構築するための実験を提案している。[167]v6, [168]v2, [185]v6は、パピルスがポリフェノール類の物質を含むかどうかを確認するための実験結果である。これは、図式(2)にある事象 $\{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ を確定する作業と解釈することができる。IBEのExplanationとなる科学的説明をつくる作業が始まっている。

科学的説明を検討していく過程で、[188]v6の投稿に専門家による証言が登場する。この証言は科学的説明を提供するものではない。しかし、これまでサークルで議論されてきた重要な疑問に答えており、v6の推論に影響を与えている。v6は褐色物質がメラニンである可能性を放棄し、最良の説明を得るために別の物質を検討することにした。レンコンの実験結果と似ていることから、クロロゲン酸が反応しているのではという仮説が登場した。そして、[188]v6の証言とレンコンを含むさまざまな植物を使った実験結果に基づいて、パピルスに含まれるポリフェノール類(おそらくクロロゲン酸)が酵素反応で酸化したため褐色化したという科学的説明がつけられた。学校の理科室ではパピルスの成分分析まではできないので、この時点で、サークルは最良の説明に到達したとして良いだろう。[188]v6にある専門家の証言が重要な役割を果たしていることがわかる。

[155]v6で、v6は褐色物質がメラニンであるという考えを説明する行為をおこなっている。この説明行為の後、メラニンであると仮定し、科学的説明をつくるためにいくつもの実験に取り組み、その結果を報告していった。このような取り組みも、広い意味では説明行為と解釈できるだろう。こうした説明行為を続ける中で、褐色物質がメラニンであることを確認するため

に専門家へ問い合わせたが、それが否定される証言（[188]v6）を得ることになった。しかし、v6やサークル構成員は、この専門家の証言に基づいてそれまでの実験結果を見直し、新たな実験を行い、先行する条件や事実を確定して科学的説明に到達するという展開になった。[155]v6以降の一連の説明行為から得られる説明（メラニン物質説）は間違っていた。しかし、その説明行為があったからこそ、[188]v6の証言が投稿された後に、最良の推論へと進み、さらに最良の説明へと到達できたのだとすれば、この展開をEBIと解釈することができる。

5.2 事例2：「水中の電球の見え方」

この事例は、ある例会で、表1のクラスター1のv1が、白色の白熱電球（シリカ電球）を水につけるとどのように見えるか知っていますかと問いかけたことに始まる。水中の白熱電球は、白い部分が縮み、それを包む透明なガラスが分厚くなったように見える。光学理論で解決する問題であることは理科サークル内ですぐに了解され、屈折や反射といった光の法則をどのように使えば、この見え方が説明できるのかがオンライン掲示板で議論された。

5.2.1 事例2のオンライン掲示板での議論

光の法則を適切に使えば科学的説明が構築できるというのは理想的、理論的な話であって、実際のオンライン掲示板での議論は、さまざまな実験によって白熱電球で何がおこっているのかを検討するところから始まった。括弧〔 〕内の番号はオンライン掲示板への投稿に付される通し番号である。番号の次の英字v1などはサークルの構成員を示す。括弧（ ）内は筆者による投稿文の要約、括弧〈 〉は筆者による補足である。

[64] クラスター3の構成員 (Dec. 5)：水に入れたメスシリンダーにインクで色をつけた水を注いで写真を撮りました。〈写真をオンライン掲示板に投稿。電球のように縮む現象が見えない〉水面上にあるほうが、ガラスの厚みがなくなっていますから、こちらの見えがおかしくて、水面下がまともように考えられます。

[65] クラスター3の構成員 (Dec. 5)：〈水に入れた中空の〉メスシリンダーに黒い紙をまらめていますが、そのときに紙とメスシリンダーの間に隙間があると、入れた紙が見えなくなります。

[66] v1 (Dec. 5)：（試験管内壁をメッキしたものを水に入れたと縮む現象が見えにくいという写真、白色電球には反射があるものと反射がないものがあり、実験したときに見え方に違いがあることを示した写真をオンライン掲示板に投稿）

[73] v6 (Dec. 7)：（2個のワイングラスに、それぞれ卵を入れて水に沈めたときの実験結果を投稿した。ひとつはグラスの口をラップで密封して中が空気、もうひとつはグラス内に水がはいっている。）

[74] クラスター3の構成員 (Dec. 7)：（試験管内壁にイソジンを薄く塗って、中空のまま水中に入れた写真を投稿）〈イソジンを塗った部分は薄く色は付くが透明で向こうが見えている〉（イソジンを塗った部分が縮み、ガラス壁が厚くなったように見えること、ガラス壁が厚くなったように見えるところは向こう側が透けて見えず、全反射が起こっていると説明）電球の場合にわからないのは、全反射が起きるような空気の層が白い物質とガラスの間にあるとは思えないのに、どうしてあんなに大きく縮むのだろうかということです。

[81] v6 (Dec. 9)：（ワイングラスに白い買い物袋を詰めてグラスの下半分を水に沈めたとき、ワイングラスにミルクを入れてグラスの下半分を水に沈めたときを比較した実験を投稿。買い物袋は縮んで全反射が

起こり、ミルクは縮んで見えない) 電球に白い物質をどう塗布しているかで気層の有無とそれに伴う、全反射の有無が決まるのでしょうか。

[82]v1 (Dec. 9): 究極の点をついた実験かもしれませんね。同じ白い物でも、ここまで明確に違いが出るとこのあと考えるのに大きなきっかけになりますね。理論だけでなく実験もやりながらドンドン解決していく良い例だと思いました。・・・これは是非高校生に考えさせて欲しいなと思います。

[93]v6 (Dec. 10): (ガラス容器ではなく、ペットボトルを使った実験でも同じ現象が確認できた写真を投稿した)

[97]v6 (Dec. 10): (ガラス容器に片栗粉を詰めて水に沈めたら、同じように縮む現象が起きた写真を投稿)

[99]v1 (Dec. 11): (電球を破壊して、ガラス球の内側を調べた写真を投稿。水中で縮む現象が起きる電球と起らない電球と比較している) 電球の中は予想通り塗料を塗布という感じではなく、粉を吹き付けてある感じです。一方、反射しない方の電球は、完全に磨りガラスの状態です。

[111]クラスター3の構成員 (Dec.13): (電球メーカーのwebサイトからの情報提供。白い粉はシリカ粒子であることを紹介)

〈このあと、例会で、フラスコ内に多数の発砲スチロール球を入れて水に沈めたときの見え方を確認する実験が行われた。その後、このフラスコと発砲スチロール球の場合の光の経路を作図する議論がオンライン掲示板で始まった〉

作図による説明についてのオンライン掲示板での議論は12月末まで続いた。厳密な作図よりも、一見して理解できるような図にすることが追求された。(i) 電球のガラス球の外壁(表面)で反射(特に、全反射)する光、(ii) 電球の内部を通して、また発砲スチロール球などで反射して、ガラス壁を通過して出てくる光、(iii) 電球の表面から入りガラス球の内壁に塗布された物質で反射する光がある。これらの光は、水、ガラス、ガラスの内壁に塗られた物質、電球内部の気体という媒質の境界面で反射、屈折する。オンライン掲示板の議論では、それまでのいろいろな実験で得られた結果をふまえて、(i) と (ii) の光の経路について、特に (ii) の光の経路についての作図が議論された。

5.2.2 事例2の推論構造の分析と考察

「水中の電球の見え方」が光学理論で解決する問題であることは、最初から理科サークル内で了解されており、解決に必要とされる屈折、反射の法則についても基本的なことは理解されていた。しかし、光学理論を使って問題を解決する前に、光学理論を適用するための諸条件を決める必要があった。光の反射や屈折がどの場所でどのような境界条件で起きているのかを明らかにしなければならなかった。しかし、この問題は光学理論がわかっているれば解答を導き出せるというものではない。

オンライン掲示板への投稿[64]クラスター3の構成員からはじまり、[99]v1で白熱電球を破壊して、電球ガラスの内壁を確認する投稿までの間に、いろいろな状況を設定しておこなわれた実験の結果が報告されていた。これらの実験結果から、光学理論を使って推論される結果は、電球ガラスの内壁には白い不透明な塗料が塗られているわけではなく、塗布物とガラス球の内壁との間に気体があるらしいということであった。こうした投稿と並行して、作図による検討もなされていた。[99]v1でガラス球の内壁の写真が投稿されたとき、白い粉末が塗布されているだけで、ガラス球の内壁はガラスと気体の境界と考えればよいと皆がすぐに納得できたの

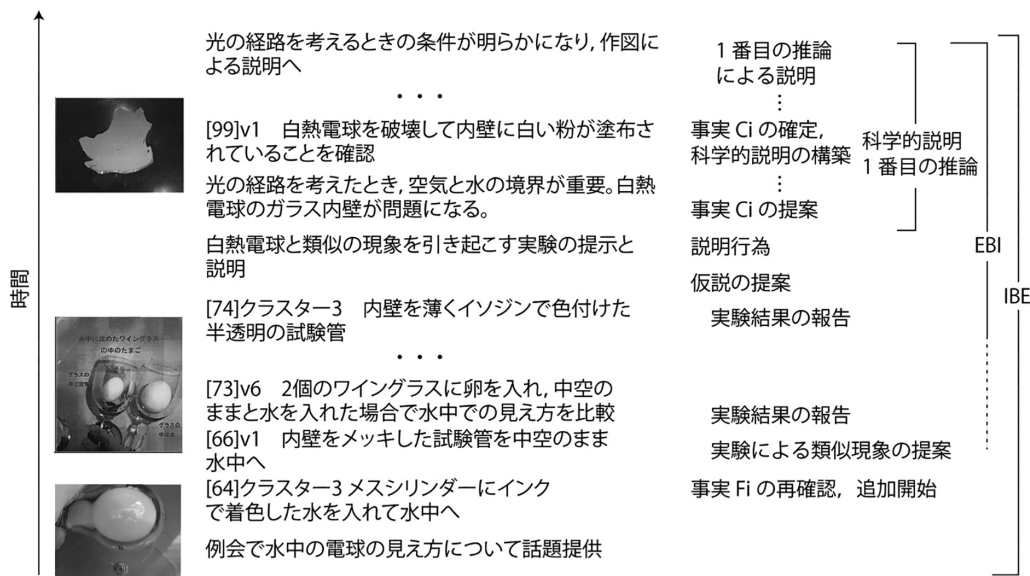


図4 事例2「水中の電球の見え方」の推論構造

は、それまでに実験結果や作図にもとづいた考察をおこなっていたからである。

オンライン掲示板上で光学法則の適用条件の決定までのやり取りに理論的道具立てをあてはめて解釈した結果が図4である。時間は図の下から上へと経過している。投稿[64]から始まり[99]v1へいたるオンライン掲示板の議論は、実験についてのさまざまな推論を経て光学法則の適用条件についての科学的説明にいたる一つのIBEの過程と解釈できる。そして、光学法則の適用条件（科学的説明）が決まれば、それを使って、水中の電球の見え方の問題を解決するための作図（これは説明の一形態）を完成させるという次のIBEが展開した。投稿[64]から作図の完成という説明へ到達するまでの議論全体をIBEとして解釈することもできる。

投稿[64]から始まる一連の実験結果の投稿は、水中の電球と同様の現象を起こす条件を検討するために、いろいろなモデルを提案して説明しようとする試みであったと解釈することもできる。こうした説明行為の積み重ねが、その後の推論で電球を破壊してガラス球の内部の様子を確認しようとする行為や、ガラス壁を無視して電球内の気体と水との境界での反射と屈折で近似して作図することへとつながった。12月上旬にオンライン掲示板上でおこなわれたさまざまな説明行為のおかげで、12月下旬の推論がよい方向に進んだと、EPIの観点から解釈することもできる。

この事例2で構築された科学的説明は、図式(3)にあるような演繹的推論の連鎖の構造をもっている。1番目の推論は、投稿[64]から始まる一連の実験結果を整理して得られた事象や投稿[99]が示した事実から、光学理論の適用条件を決める推論であった。その光学理論の適用条件を使って水中の白熱電級の見え方を説明する作図を完成させることが2番目の推論であった。ガラス内壁に塗布された物質の状況などの諸条件が決まれば、気体、ガラス、水の境界で起きる光の反射と屈折の法則によって、光の経路は同時に決まる。したがって、上述の2つの演繹的推論の連鎖で使われたのはどちらも同時法則であり、科学的説明は非因果的説明の連鎖になっている。

5.3 理科教師が納得する科学的説明

事例1では、植物の褐色化の例がいくつも紹介され、それに関係した実験結果がオンライン掲示板に投稿された。説明の大きな枠組みとしては、植物Xに含まれている物質Yが酵素の酵素反応を受けて褐色化した生成物Zに変わるというものである。植物Xには、パピルスの他に、リンゴ、バナナ、パイナップル（いずれも実）、茶葉、レンコン（地下茎）、ゴボウ（根）といった空气中に放置すると変色する植物が登場した。植物の部位はさまざまである。物質Yはポリフェノール類であるという大括りの理解から始まり、考察の対象としている植物によって、カテキン、リンゴポリフェノール、アントシアニン、タンニン、クロロゲン酸が議論された。酸化酵素については今回の理科サークルの議論では深まらず、酵素による酸化反応という理解で検討は続けられた。

このような議論の展開をふまえて、事例1で達成した科学的説明に対して、第4.3節で紹介した論証パターンを考えてみる。

・図式的論証

- 1) Xにはポリフェノール類が含まれている。
- 2) そのポリフェノール類はYである。
- 3) Yは酸化酵素の反応を受けてZになる。
- 4) Zの色はYの色とは異なる。
- 5) Xを放置しておくとも色が変わる。

・代入指示

(7)

Xには植物の名称が入る。植物の部位は、葉、実、茎、地下茎、根などさまざまである。Yにはポリフェノール類に属する物質である。Zは酵素反応の生成物である。

・図式的論証の分類

XとYが決まれば酸化酵素による反応がわかるので、1)は2)と3)の前提である。5)は1)から4)より導出される。

オンライン掲示板での展開は、パピルス以外のXでこの論証パターンの有効性が確認されていった。Xにパピルスが代入されたときに、YとZがわかれば、この論証パターン(7)が与えてくれる説明は理科サークルの構成員にとってすぐに納得できるものであっただろう。実際の検討では、パピルスに含まれるポリフェノール類が何かを同定することはできなかった。しかし、Xにさまざまな植物を代入した場合を検討することによって得られた論証パターン(7)の統合力が理科教師たちの納得につながったと考えることができるだろう。

事例2では、水中の白熱電球の見え方に類似したいくつもの実験結果がオンライン掲示板に投稿された。これら実験結果は共通の特徴をもち、科学的説明はこうした複数の事象に対して納得のいく説明を与える統合力のあるものでなければならなかった。しかし、科学的説明を構築する議論が光の経路を描いた図を用いておこなわれていたため、そこから統合力をもったひとつの論証パターンを読み取るのは難しい。さらに、オンライン掲示板で検討された光の経路の作図は、縮尺を考慮した厳密な図を作成することではなく、水、ガラス、気体といった媒質の境界条件によって引き起こされる現象をわかりやすく説明してくれるモデル図を描く

ことであった。図自体や作図の考え方について議論するなかで、図を読み解く約束事がつくられていき、それが図による視覚的説明のもつ統合力をつくっていったと考えられる。これを論証パターンとして表現できるのかは今後の課題である。

6 結論

理科サークルが使っていたオンライン掲示板に着目し、そこで展開された問題解決のやり取りがもつ推論構造を、認識論や実験心理学の知見を使った理論的道具立てと科学的説明の理論を使って考察した。原因物質とその化学反応を説明する問題解決と光学現象を作図によって説明する問題解決の2つの事例を検討し、オンライン掲示板でのやり取りに対してIBEなどの理論的道具立てをあてはめて解釈した。問題解決の議論全体がもつ推論構造をIBEとして把握し、その枠組みの中に、説明項となる実験結果を提示する過程、科学的説明を試みる過程、証言に関わる過程などがいくつも埋め込まれていた。さらに、オンライン掲示板上のやり取りによって理科サークルが達成した説明がもつ論理的構造をヘンペルのD-Nモデルを使って考察し、理科サークルの構成員が科学的説明を受け入れて納得することについて、キッチャーの説明に役立つ統合という観点から論じた。

事例2についてのやり取りの中で、オンライン掲示板に「この解決のために、いろいろなシステムを使ってやっているのもおもしろいです。今までだとかはやく進んでいく事がなかったでしょうね。顔を合わせて実験をして、また持ち帰ってまた実験をして、持ち寄って、・・・というのがそれぞれバラバラのところにいるのにドンドン進みます。便利な世の中になったし、それを使える環境にいることを感謝します」という投稿が理科教師からあった。例会、ML、オンライン掲示板という複数の相互交流の場所を活用し、ある期間に特定の問題を解決する探究活動が、理科サークルの教師たちに刺激となっていたことがわかる。

理科サークルの活動を教師の研修としてとらえると、それは用意された講習を受ける、受けさせられるという受け身の研修ではなく、共通の問題に対してどれだけ積極的に取り組むかを各自が判断し、いろいろな相互交流の場所をつかって自分の能力を高めていく能動的な研修だと考えることができる。こうした能動的な研修の場を教育委員会や学校が組織的に業務のひとつとしてつくるのは難しいだろう、理科サークルのような実践コミュニティの存在意義は大きい。しかし、教師の多忙化、少子化による学校規模縮小などのさまざまな要因から、理科サークルは困難な状況に直面している。このような状況が続けば、将来、日本の理科教師からダイナミズムが失われてしまうのではないかと危惧する。

最後に、中学や高校における理科授業に対して本論文の結果が示唆することを述べる。第1節序論で述べたように、さまざまな状況にある学校でひろく探究活動を実践していくには、「探究」という概念を科学的説明の構築という観点からとらえなおす必要がある。いくつかの説明を吟味し最良の科学的説明へといった問題解決の活動を生徒がおこなうとき、知識や経験が十分ではない生徒が、第3.3節の「不良な一群の中での最良」に陥ることなく実行できるかが課題になるだろう。そして、第3.4節で紹介した証言をどのように使うのかも鍵になると筆者は考えている。本発表の事例が示唆するように、推論を進めるために証言は重要な役割を果たしている。証言とは、教師が生徒に解答を与えてしまうことではない。知識や経験に乏しい

生徒が理科の授業で探究に取り組む場合、教師が頃合いをとらえて適切な内容の証言を提供する、生徒がうまい具合に証言を探し出すといった場面を探究活動の中でつくらなければならない。今後の課題である。理科実験室の壁に貼紙して、IBEで考えなさい、「不良な一群の中の最良」にならないようになどと周知徹底しても意味はないし、むしろ害になる。記憶し、形式的に実行することではなく、効果的に体得していくことのできる理科授業をどのようにつくっていくのかが問われている。そして、そのためには、まずもって理科教師がそうした活動を自分たちで実践し、経験を蓄積しておかなくてはならない。

本研究はJSPS科研費 JP19H01634の助成を受けたものである。

本論文は、日本教育方法学会第57回大会・自由研究6（2021年9月25日）における発表「理科教師の非同期オンラインネットワーク活動から考察するエビデンスと説明の関係」の資料を加筆修正したものである。

文献及び註

1. Wenger, E. (1999). *Communities of Practice: learning, meaning, and identity*. Cambridge: Cambridge University Press.
2. ウェンガー, E. C., マクダーモット, R. T., スナイダー, W. M. (2002). 『コミュニティ・オブ・プラクティス：ナレッジ社会の新たな知識形態の実践』 櫻井祐子訳, 翔泳社, p. 33.
3. ヘンベル, C. G. (1967) 『自然科学の哲学』 黒崎宏訳, 培風館, 86頁.
4. 目の前の現象を説明するために必要な知見は何かに気づくことや、文献や資料を調べていくなかで適切な検索語は何かを見つけるなど、個人的には「発見」と表現できることは起きるだろう。本論文では、理科サークルの構成員一人ひとりの認識形成ではなく、実践コミュニティである理科サークルで展開されたやり取りの推論構造を考察の対象としている。
5. 文献2の監修者序文12頁。実践コミュニティと組織図にあるグループやプロジェクト・チームとの違いについては、Wenger, E. C. and Snyder, W. M. (2000). *Communities of Practice: The Organizational Frontier*. *Harvard Business Review*, vol. 78, p. 139-145.
6. この理科サークルはコンテンツ・マネジメント・システム (NetCommons) のオンライン掲示板を使って本論文のやり取りをおこなっていた。NetCommonsの最新版についての情報は以下を参照。
<https://www.netcommons.org> (2022年3月31日確認)
7. Ohno, E. (2008). Case Study of Computer-Supported Network embedded within a Science Teacher Community of Practice. *Proceedings of the International Conference on Physics Education 2006*, p. 325 - 326.
8. 図1と表1は文献7より和訳引用した。ネットワーク解析については、Wasserman, S. and Faust, K. ([1994] 1997). *Social Network Analysis*. NewYork: Cambridge University Press.
9. 大野栄三 (2007). 「教師コミュニティにおけるネットワークを介した共同作業の分析」『2007PCカンファレンス論文集』 コンピュータ利用教育協議会, 北海道, 2007年8月2-4日,
<http://hdl.handle.net/2115/30293>, (2022年3月31日確認).
10. オンライン掲示板上の議論がもつ推論構造から、実践コミュニティである理科サークルが全体として科学的説明に到達したのかを判断することはできる。しかし、各構成員の認識形成について考察することは

限られている。周辺的に参加している者が、本論文の理科サークルではクラスター3の構成員が、活動から何を得たのかを知るにはインタビューなど個別の調査が必要である。

11. Lipton, P. (2004). *Inference to the Best Explanation* (2nd ed.). New York, NY: Routledge.
12. 認識論の用語としての「証言」であり、法律用語としての「証言」よりも広い意味をもつ。McCain, K. (2016). *The Nature of Scientific Knowledge: An Explanatory Approach*. Dordrecht: Springer, ch.15.
13. Wilkenfeld, D. A. and Lombrozo, T. (2015). Inference to the Best Explanation (IBE) Versus Explaining for the Best Inference (EBI). *Science and Education*, vol. 24, p. 1059-1077.
 説明に着目した心理学分野の研究は多く、説明（説明することを他者に教えることと捉える場合も含めて）が説明する者の理解を促すことを示唆している。たとえば、
 伊藤貴昭, 垣花真一郎 (2009). 「説明はなぜ話者自身の理解を促すか：聞き手の有無が与える影響」『教育心理学研究』57巻, 86-98頁。
 小林敬一 (2020). 「他の学習者に教えることによる学習はなぜ効果的なのか？：5つの仮説とそれらの批判的検討」『教育心理学研究』68巻, 401-414頁。
 説明行為と説明がどのような影響を与えているかの詳細についてはさらなる研究が必要であろう。ここでは、説明行為がその後の推論に影響を与えることに着目する考え方をEBIとした。
14. 文献11の他に、IBEの動向については、たとえば次の文献がある。
 McCain, K. and Poston, T. (Eds.) (2017). *Best explanations: new essays on inference to the best explanation*. Oxford: Oxford University Press.
15. 註12の文献, ch.10.
16. McCain, K. (2020). How Do Explanations Lead to Scientific Knowledge? In K. McCain and K. Kampourakis (Eds.), *What is Scientific Knowledge?* (p. 52-65), New York, NY: Routledge.
17. Lycan, W. G. (2002). Explanation and Epistemology. In P. K. Moser (Ed.), *The Oxford Handbook of Epistemology* (p. 408-433), Oxford: Oxford University Press.
18. 米盛裕二 (2007) 『アブダクション：仮説と発見の論理』 勁草書房.
19. Douven, I. (2021). *Abduction*. In Stanford Encyclopedia of Philosophy. <https://plato.stanford.edu/entries/abduction/>, (2022年3月31日確認).
20. 文献15, p. 161-163.
21. 文献11.
22. たとえば、トーマス・クーンは優れた科学理論を評価する基準として、精確であること、無矛盾であること、適用範囲が広いこと、単純であること、実り豊かであることの5つを以下の文献であげている。
 トーマス・クーン (1998) 『科学革命における本質的緊張：トーマス・クーン論文集』 安孫子誠也, 佐野正博共訳, みすず書房, 417頁
23. 文献15, ch.1.
24. 文献13.
25. Walker, C. M., Lombrozo, T., Legare, C. H., and Gopnik, A. (2014). Explaining prompts children to privilege inductively rich properties. *Cognition*, vol. 133, p. 343-357.
26. ファン・フラッセンがIBE批判を展開している。以下の文献のch.6, p. 143で “the best of the bad lot” に言及している。
 van Fraassen, B. C. (1989). *Laws and Symmetry*. Oxford; New York: Oxford University Press.
27. Audi, R. (2002). The Sources of Knowledge. In P. K. Moser (Ed.), *The Oxford Handbook of*

Epistemology (p. 71-94), Oxford: Oxford University Press.

28. 内井惣七 (1995)『科学哲学入門：科学の方法・科学の目的』世界思想社，120頁。
この文献の第4章では，科学的説明の理論について，歴史的変遷を踏まえて詳しく述べられている。
29. 演繹的-法則的モデル (D-Nモデル) 以外に，統計的法則から別の統計的法則を演繹して説明する演繹的-統計的モデル (Deductive-Statisticalモデル：D-Sモデル) や，D-Nモデルにある自然法則 (普遍的法則，一般的法則を含む) の代わりに統計的法則を使って個別事実を説明する帰納的-統計的モデル (Inductive-Statisticalモデル：I-Sモデル) がある (文献28参照)。理科サークルのオンライン掲示板では統計的法則が関係するやり取りがなかったので，これらモデルは本論文では使わない。
30. 文献 3，89頁，及び，ヘンペル，C. G. (1973)『科学的説明の諸問題』長坂源一郎訳，岩波書店，第2章2.1.
31. 黒崎宏 (1971)「科学的説明の特質」『岩波講座 哲学 XII 科学の方法』岩波書店，329-353頁
32. この第4.2節の因果的と非因果的の違いについての内容は前掲書を参考にした。
33. Kitcher, P. (1981) Explanatory Unification. *Philosophy of Science*, vol. 48, p. 507-531.
34. Kitcher, P. (1989) Explanatory Unification and the Causal Structure of the World. In Kitcher, P., Salmon W. C. (Eds.), *Scientific Explanation* (p. 410-505), Minneapolis: University of Minnesota Press.
35. 前掲書，p. 446.

Research Activities and Construction of Scientific Explanations Using Online Bulletin Board in a Science Teachers' Club.

OHNO Eizo

Key Words

Community of Practice, problem solving, inquiry, in-service training of teachers

Abstract

A science teachers' club is considered as a Community of Practice. Members of science teachers' club are like-minded individuals belonging to various schools in a local area. Science teachers meet regularly face-to-face at a meeting after school or on a day off to discuss topics of common interests. They develop their shared practices and build a common store of knowledge informally. We have investigated problem-solving activities of the science teachers' club where e-mailing list and online bulletin board were also used in addition to monthly meetings. In this study, the reasoning structure of the exchange of messages for problem-solving posted on the online bulletin board is analyzed, using epistemological tools and knowledge of experimental psychology. We examine two cases: (1) problem-solving to explain substances that cause discoloration and their chemical reactions, and (2) problem-solving to explain strange optical phenomena. The exchange of messages on the online bulletin board is interpreted by applying epistemological tools such as Inference to the Best Explanation (IBE), Explaining for the Best Inference (EBI) and testimony. The inference structure of the entire problem-solving discussion was grasped as IBE. The processes of EBI and testimony were embedded there. The logical structure of the scientific explanations achieved by the science teachers' club is examined using Hempel's D-N model. The acceptance of scientific explanations by members of the science teachers' club is discussed in terms of the notion of explanatory unification.