

ティンダルの科学活動におけるモデルとアナロジーの意義

杉 山 滋 郎

一 はじめに

ジョン・ティンダル⁽¹⁾の広範な科学活動の様々な面は、彼の物質観に強く影響されていた⁽²⁾。その物質観とは、物質は微小な粒子⁽³⁾から構成されており、固体・液体・気体ではそれらの凝集・運動の様式が異なる、というものである。

物質が微小な粒子から成っているという見解自体は、一八六〇年代から気体分子運動論が興隆してきたことを想起するまでもなく、決してティンダルに特有のものだったわけではない。ただティンダルは、まず第一に、物質が分子・原子から構成されているということをも単に一般的に主張したのではなく、それを越えて、分子・原子の形状・配列など、分子・原子による物質構成の具体的状態にまで立ち入って議論を展開したし、第二に、科学の理論的・実験的な研究という場面のみならず、それ以外の様々な科学活動においても、そうした物質観に影響されていた。その意味でティンダルは、当時の他の科学者たちよりもはるかに強く、そうした物質観にコミットしていたのである。

本稿では、そうした物質観がティンダルの科学活動においてどのように機能し、彼の活動にどのような特徴を付与することになったのかを、モデルおよびアナロジーという概念を軸に据えて考察する。

二の一 アナロジーとモデル

科学におけるモデルやアナロジーに関しては、M・ヘッセがデュエム主義者とキャンベル主義者との対話に仮託して詳細に論じ、それに対するD・H・メラールの批判があるし、ブラックの議論もある。⁽⁴⁾そこで本稿では、それらの議論をふまえた上で、アナロジーおよびモデルという概念について次のように考えることにする。

二つのまったく異質な現象それぞれを記述する二つの別個の法則が、その数式的表現だけに着目したときには同一である、ということがある。熱の伝導法則と電気の伝導法則、光の伝播に関する法則と音の伝播に関する法則などがその例である。⁽⁵⁾こうしたとき、二つの法則あるいは理論どうしの間にはアナロジーの関係があると呼ぶ。そして、アナロジーという関係で結ばれる項（法則あるいは理論）を実現するものとして想定された存在物を、モデルと呼ぶ。光に関する理論を、音に関する理論とのアナロジー関係を利用して考究する場合を考えてみよう。このとき、光に関する法則と音に関する法則とのアナロジーから、音と同様に光も波動であるとされ、光の波動を担う媒質（エーテル）が存在すると考えられる。そして空気（あるいは一般には適切な流体）が音における反射の法則などを実現している媒質であるから、その（空気など適切な）流体が光波を担うエーテルのモデルとなる。

ピリヤード・ボールが気体分子運動論における気体分子のモデルである、というときにも、同様の事態が生じている。この際には、ピリヤード・ボールの従う力学的法則（衝突の法則など）と気体分子の従う法則とのアナロジー関係が措定されており、衝突の法則を実現している（衝突の法則に従っている）ピリヤード・ボール（あるいは一般には、当の衝突の法則を実現する限りでの適切な物体）が気体分子のモデルだとされているのである。

なお、そもそもモデルやアナロジー関係がどのようにして発見されるのかは、本稿での関心の外にある。というのも、ティンダルの物理学研究における特徴を、アナロジーやモデルという概念を用いて剔出することが本稿での目標であり、ここでは、そのために必要な限りでアナロジーやモデルの概念を明確にしようとしているにすぎないからである。同様な理由で、ティンダルはデュエム主義者であったのか、あるいはキャンベル主義者であったのかとか、そもそもデュエム主義とキャンベル主義とはどのように対立するのかといった問題も、本稿での関心の外にある。

二の二 不可視的なものと可視的なものを繋ぐためのアナロジー

さてティンダルは、アナロジーを頻繁に、しかも実に有効に駆使している。その具体例をいくつか挙げよう。

彼は可視光のスペクトルについて説明を与えるとき、音について音階（音の高さ）を説明してから、「そのスペクトルの目に対する関係は音階の耳に対する関係と同じである」と言う。また、耳に聴こえないほどピッチが高い音あるいは低い音があるのと同じように、紫の先には目に見えないほどピッチの高い光線があり赤の先には目に見えないほどピッチの低い光線がある、として不可視光（熱放射）の存在を論ずる。あるいはまた、反射の法則が可視光と不可視光の両方に対して同じように成り立つことを実験的に示すことで、両者がアナロジー関係にあることを例証したりもする。⁽⁸⁾

これらのアナロジーは、現象的なもの（つまり可感的なもの）どうしの間でのアナロジーである。第一・第二の例においてアナロジー関係にある項は、可視光の色の広がりと同聴音の音程の広がりであるし、第三の例においてアナロジー関係を具現しているものは（可視光、不可視光それぞれについての）反射の法則、すなわち光源・反射鏡・光検出器の可視的な位置関係である。

だが、ティンダルによるアナロジーの使用にみられる特徴は、物質の *molecular constitution* を探究するための手段としてそれを駆使する点にある。つまりティンダルは、彼のいう不可視的なもの（*the invisible*）と可視的なもの（*the visible*）とを繋ぐものとして、言い換えれば、可視的なものを通して不可視的なものについて探るために、アナロジーを活用するのである。たとえばある機会に、不可視なものについての物理学上の観念がいかにして得られるのかについて、次のように語っている。

直線の観念をユークリッドの定義から獲得した人は未だかつていない。直線の観念は、ペンや鉛筆で書かれた現実の具象的直線、したがって幅をもった直線から獲得されたのであり、幅の概念は抽象的作用によって後に捨てられたのである。物理現象についても同じことが言える。我々は不可視なものを、可視的なものから導出した適切な像によって把握し、後で、そうして得られた観念を純粋化するのである。⁽¹⁰⁾

あるいはまた、一般向けの講演を編纂した *Heat Considered as a Mode of Motion* でのティンダル議論の運び方にも、可視的なものと不可視的なものとの架け橋にアナロジーを活用するという、ティンダルによるアナロジーの使用にみられる特徴が出てくる。⁽¹¹⁾ 彼はまず、音波について、例示実験を交えながら長々と説明する。そのあと、「私はなぜ音についてのこうした実験をしたのでしょうか。それはただ単に、熱の場合にどんなことが起こっているのかを明瞭に理解して頂くため、触れることのできるものから触れることのできないものへ、感覚の世界から物理理論の世界へとあなたがたを導くためだったのです」と述べて、空気の振動（音）とのアナロジーでエーテルおよび物質粒子の運動（すなわち光および熱）へと論を進めて行くのである。

ティンダルが、可視的なものとのアナロジーで不可視的なものに関して立論している例を上二つ挙げた。これらの例はいずれも一般向けの講演（popular lecture）から採ったものである。したがってこれらは、不可視的なものについての（アナロジーを用いることなく得られた）探究結果を説明する場合にティンダルがアナロジーを駆使していることを例証するものでしかない、とも考えられよう。そこで今度は、ティンダルが不可視的なものを理論的あるいは実験的に自分自身で探究する場合にもアナロジーを駆使していることを示そう。

ティンダルによる熱放射についての研究から、いくつかの場面を取り出してみよう。⁽¹²⁾
 まず彼自身、ロイアル・ソサエティでの講演で、⁽¹²⁾ 熱放射についての自分の研究のプロセスについて次のように回想している。

私はこの十年間、光栄にも、スペクトルにおいて屈折率の小さい方の放射線（rays）をして物質の分子状態の解釈者・探求者とすることを主要な目的とした一連の研究をロイアル・ソサエティに提出してきた。

……私は、分子および分子による「物質の」構成について、今日の科学が正当化するかもしれないのは確かさを保証するような描像を心に想い描き、また光エーテルとその運動について波動理論が許容するような描像を心に想い描き、分子的構成に関してより確実な理解を与えてくれるような実験をそうした描像に基づいて構想し遂行しようと努めた。

というわけで、物理学上の明確な観念が、そうした研究の全過程に伴い、それを導いた。物質が原子や分子からなっているということは、真なることとして常に受け入れていた。或る現象を調べた結果、倍数比例の法則でとどまることはできなくなった。もつとも、今日の多くの化学者は、その法則を、理解できる限界と見なしがちなのであるが。一連のエアテル波を観念の上で源まで辿って行ったとき、その源に倍数比例を据えることはできなかった。というのも、波をこうした倍数と物理的に結び付けることができなかったからである。私はその源に、振動する弦——それは空気の運動を受け入れたり弦の振動を音の波として放射したりする——が空気に對して持つと同じ関係をエアテルに對して持つ微量の物質——言い換えれば分子——を置かざるを得なかつた。⁽¹³⁾

ここでティンダルは、熱放射についての研究において一貫して、物質が分子・原子から成っていることを前提にしてきたと明言し、そうした前提へと導かれる上で、弦および空気と分子およびエアテルとの間のアナロジイが大きく寄与したことを認めている。

だが、これは所詮回想であるから、無意識的あるいは意識的な再構成が含まれているかも知れないし、さらにまた本人の発言が本人の爲したことをもつとも正確に表現しているという保証もない。したがって我々としては、ティンダルの考察が進展していった現実の過程にできる限り即して、そこでのアナロジイの役割を確認する必要がある。

二の三 不可視的なものと可視的なものを繋ぐためのアナロジイ(続)

一八六一年にティンダルは、「ガスと蒸気による熱の吸収と放射について、ならびに放射・吸収・伝導の間の物理的関連について」のある箇所、物理学の現状について、熱の本性についてはかなり明らかになったものの、放射・吸収・伝導といった現象の基礎にある原子的過程についてはなお解明されていないと述べ、後者の例としてたとえば次のような問にまだ十分に答えることができなしていると指摘している。⁽¹⁴⁾

1. 放射力が物質ごとに違うのはなぜか。
2. 放射力と吸収力との間にある相応関係の理論的根拠は何か。

3. 透熱性の物体 (a diathermanous body) が不良放射体 (a bad radiator) で不透熱性の物体 (an athermanous body) が良放射体 (a good radiator) であるのはなぜか。⁽¹⁵⁾
4. 熱はどのように伝導される (be conducted) のか、そして熱の良導体および不良導体とはどういうことなのか。
5. 概して、熱の良導体が不良放射体であり、不良伝導体が良放射体であるのはなぜか。

ティンダルは、こうした問題を主題的に扱った第十節「放射・吸収・伝導の間の物理的関連について」⁽¹⁶⁾で、「或る共通の絆によってこうした様々の作用を結び付ける可能性の概略を示す」という控え目な表現ながら、まだ完全には答えられていないこれらの問に対し自らの解答を提示しようと意気込んでいる。つまり、これらの問の中に述べられている現象や作用の存在そのものについてはすでに概ね確立されているとした上で、それらの現象や作用に対し原子的過程から説明を与えようというのである。

たとえば上記の問2に関して、ティンダルは次のように論ずる。彼はまず、自分の実験によって、いかなる物質においても熱放射の吸収が確認された、という事実を指摘する。そしてこの事実は、熱の本性についての動力学的理論に基づけば、振動するエーテル中に存在する原子はそのエーテルの運動の一部を受け取ることの意味している、と彼は言う。その上で、エーテルとそのエーテルの大海中に浸っている原子との間で運動のやり取りのメカニズムについて次のように語る。「エーテルが原子を噛み、その原子をエーテルと一緒に運んでいくことを可能にするような或る粗さを原子の表面に想定することが、お望みなら、許されよう」⁽¹⁸⁾

ティンダルはここで、物体どうしの噛み合いという、日常的な(したがって可視的な)物体について見られる運動伝達のメカニズムをモデルにして、不可視的なエーテルと原子との間での運動の伝達を立論している。だが、ここでの物体どうしの噛み合いはあくまでも一つのモデルであって、エーテルと原子とが必ずしも文字どおりに噛み合うと主張しているわけではない。要は、或る物体の運動が別の物体に伝達されるメカニズムの具体例(具体的イメージ)を与えることができればいいのであって、噛み合いではなく、場合によっては磁力による相互作用であっても構わないのである。⁽¹⁹⁾ティンダルが上の引用文のすぐ後に、「しかし、運動するエーテルから原子が運動を受け取れるようにする性質(quality)がどのようなものであるにしろ……」⁽²⁰⁾と続けていることから、物体どうしの「噛み合い」という実例は、アナロジカルな推論のための一つの

モデル（具体例）でしかないことが判る。

さて、上に引用した譲歩節に次のような主文が続く。「運動するエーテルから原子が運動を受け取れるようにするのと」同じ性質が、静止エーテル中に浸ったまま動かされた原子がその静止エーテルに運動を受け渡すことを可能にするに違いない。²¹⁾この論点を支えるのは、再びアナロジである。彼はこう続ける。「これが本当であるに違いないことを知るには、水の中に浸された物体を想像してみるだけで十分である。²²⁾

こうして、上述の問題²⁾に対するティンダルの答えは結局、原子がエーテルから運動を受け取るメカニズムがどのようなものであるにしろ、それと同一のメカニズムが、原子がエーテルに運動を受け渡すときにも作用するのだから、吸収力と放射力との間に相応関係があるのは「理論的根拠からして」²³⁾当然である、というものであった。

アナロジに基づくティンダルの推論は更に進んで、同一物体の吸収力が放射の波長に依存することの考究にも適用された。ティンダルはまず、自分の実験した種々のガスや蒸気はすべて、熱放射は大なり小なり吸収するものの可視光は吸収しない（可視光に対して透明である）という事実¹⁾に目を向け、そしてこの事実を、キルヒホフとブンゼンの研究を踏まえた上で、吸収力はエーテル波の振動数と原子・分子の固有振動数との一致・不一致に依存するという考えに物質の原子・分子的構成の議論を組み合わせることによって説明しようとしたのである。彼は次のように論じた。

さて、単独の原子が結合してグループを成せば、エーテルに対し大きな表面を向けるというだけではなくて、一般に、エーテル中での運動が一層ゆっくりなものになり、振動の周期が、見えない熱（Obscure heat）の遅い振動（周期）と一致するようになって、その分子（原子のグループ）は、我々が実験で用いた熱線（rays）をより効率的に吸収することができるようになるに違いない。²⁴⁾

要するに、ドルトンに倣って球形であると考へた原子が、複数個集まって分子を成すと、エーテル中での運動に対し抵抗が大きくなり、固有振動数が小さくなって、熱放射とは同期するが可視光とは同期しなくなる、したがって複数個の原子から成る分子で構成されるガスや蒸気は、可視光に対し透明である、というのである。ここにはアナロジやモデルという表現こそ出てこないものの、原子が結合してグループを成すと

エーテルに対する抵抗が増すという主張の背後には、結合した複数個の球の方が球一個だけよりも流体中での運動に際し抵抗が大きいという、日常的な経験とのアナロジーが潜在していると考えられる。

物理現象を物質の原子・分子的構成から説明するというティンダルの試みにおいてアナロジーが極めて重要な役割を果たしたことは、熱伝導性と透熱性の関係についての彼の考察過程においても見て取ることができる。

ティンダルは、熱伝導性の大きい物質は透熱性も大きいという、熱伝導性の大小と透熱性の大小との並行関係に対し、以下にみるように、「分子のエーテル中での滑り動き易さ」という概念で説明を与えた。それは、前掲の問3と問5に対する彼なりの解答でもあった。

ティンダル自身の述懐によれば、彼は、各種物質の熱伝導性について実験を行っているときに、⁽²⁶⁾熱伝導性の大小と透熱性の大小との間に並行関係があることに気づいた。⁽²⁷⁾メローニが、ミョウバン (alum)、透セッコウ (selenite)、ガラス、石灰石 (calcareous spar)、岩塩 (rock salt) はこの順に透熱性が大きくなることを示していたが、ティンダルは自らの実験で熱伝導性もこの順に大きくなることを見いだしたのである。我々の興味を惹くのはこの並行関係についての、物質の原子・分子的構成に基づいたティンダルの理論的説明である。

ティンダルはまず、岩塩の熱放射力が極めて小さいというB・ステュワートの実験事実から、岩塩の分子が「(ミョウバンの分子に比べて)かなり小さな抵抗でエーテル中を滑り動く (slide)」、⁽²⁸⁾ことができるのだと主張する。岩塩分子はエーテル中を小さな抵抗で滑り動くことができるがゆえに、岩塩分子とエーテルとの間で運動の移行が起りにくい、言い換えれば岩塩の熱放射力あるいは熱吸収力が小さい(したがって透熱性が大きい)、と考えたのである。⁽²⁹⁾

その上でティンダルは、岩塩分子がエーテル中で滑り動き易いというこの考えを熱伝導の説明にも適用して、エーテル中で分子が動き易いということは分子どうしの衝突が起り易いということであって、すなわち物体中を熱が伝導し易いということである、と主張する。ミョウバン分子のように、逆にエーテル中で滑り動きにくい時は、分子の運動の大部分が分子間のエーテルに移行してしまい、分子の運動が他の分子へ伝わることは少ない、言い換えれば熱放射力あるいは熱吸収力が大きい(したがって透熱性が小さい)のだという。

ここに紹介した「ガスと蒸気による熱の吸収と放射について、ならびに放射・吸収・伝導の間の物理的関連について」でのティンダルの叙述

自体は、彼の思考の基礎にあった具体的モデルを明示的には明かしていないが、それでも、「分子のエーテル中での滑り動き易さ」といい「分子どうしの衝突」といい、考察を進めるにあたって或る種のモデルが彼の思考を領導したことを充分に窺わせてくれる。実際、ティンダルとストークスとの書簡による批判・反論の応酬など、ロイアル・ソサエティで Bakerian Lecture として先の論文を読んだ後の事態の推移を追ってみると、ティンダルは実は或るモデルを念頭におき、それとのアナロジーで考察を進めていたのだということが一層明らかになる。

ストークスは、ティンダルの論文「ガスと蒸気による熱の吸収と放射について……」が印刷されるにあたって、レフェリーの一人として、フランツ (Franz) の実験についてのティンダルの評価などに対して批判的コメントを述べると同時に、「私が論評すべき唯一の重大な点」として、熱伝導力と透熱力との並行関係（熱伝導力と熱放射力との負の並行関係）についてのティンダルの見解に批判を加えた。⁽³⁰⁾ その批判は次の二つの観点からなされた。

第一は事実に基づくものである。ティンダルのいう並行関係に反する事例があるから、ティンダルのいう並行関係はそもそも「物理法則」とは見なしえない、というのである。ストークスが指摘した事例は木炭（黒鉛）に関するもので、木炭はほぼ間違いなく良放射体であり同時に熱の良伝導体でもある、というのであった。

第二は理論的な批判である。ティンダルの議論は、振動運動する分子が一度ないし二度の振動でその運動エネルギーの大部分をエーテルもしくは他の分子に伝達してしまうことを前提にしている、とストークスは考えた。ストークスがそう考えた理由は、「あなた（ティンダル）は、良放射体においては、或る分子が（その持つ）運動の多くを隣接する分子に伝えることはない、なぜならその分子は運動を、（隣接する他の分子に伝えるよりも前に、）緩衝材として機能する別のもの（エーテル）に伝えてすでに失ってしまったからである——こうお考えだからである。」しかし、もしこの前提が成り立たないとすれば、すなわち、或る分子がその分子の振動の一周期の間にエーテルに伝達して失う運動がごく少量であるとすれば、分子の振動運動のエーテルへの伝達と隣接する他の分子への伝達とがともに生ずる筈だ、とストークスは主張した。

ここでのストークスの議論をいささかなりとも判りやすく言い換えれば次のようになるであろう。エーテル中に浸って運動する分子は、その運動を隣接する他の分子に伝達する間もないうちに、周囲のエーテルにエネルギーを与えて減衰してしまうとティンダルは考えている、とストークスは理解した。ここで（ストークスの理解した）ティンダルは、そしてストークス自身も（少なくともティンダルへの批判を目的としたこ

での議論においては)、或る分子の運動がエーテルを介して他の分子に伝達される、という事態は考慮していないようである。ストークスのティンダルへの批判を筋の通った形で解釈するにはそう理解せざるを得ないし、上に引用した箇所(ストークスの理解した)ティンダルが、エーテルは「緩衝材として機能する」としていることも我々のそうした解釈の妥当性を保証してくれる。さてそうすると、もしティンダルの仮定とは逆に分子の振動はなかなか減衰しないのだとすれば、分子はエーテル中へごく僅かずつ運動を散逸させていくのと並行して、隣接する分子に直接に(すなわちエーテルを介さないで)運動を伝達することもできるはずだ。

このように考えたストークスは、自らの仮定、すなわち振動の一周期の間に分子からエーテルに伝達される運動が僅かであるという、ティンダルとは逆の仮定を支持するものとして、フィゾーおよびフーコーによって研究された干渉の現象を挙げる。ストークスが言うには、彼らの示した干渉という事実こそが、「振動する分子の運動が、引き続き非常に多くの振動にわたって実質上同じであって、一度の振動では運動のごくわずかの部分だけが失われうるに違いない、ということを示しているように思われる」。なぜなら、その干渉の現象においては、波源からの或る波が、同一波源からの、何周期分も時間的に前後するほとんど同一振幅の別の波と干渉しているのだから、とストークスは言いたのである。

ストークスは先の手紙の十日ほど後に、ティンダルの議論は光学の研究(先述の干渉に関する研究)が示しているのと違うことを想定しているが故に、「決して確実なものとはいえない」と、前記の論点に関して再びティンダルを手厳しく批判した。⁽³¹⁾ もっともストークスは、「(熱)放射」と(熱)伝導との関係について言えば、かくも重要な仕事を為した人に対して指図することは、あるいは勧告することでさえ、私の任ではないと思う」と述べ、手紙の最後を、「論文の最後の章(放射と熱伝導の関係を扱った第十節)に満足されたなら直ちに印刷にお返しになるべきだと思います」と結んでいる。

ストークスからのこうした批判に対し、ティンダルは次のように自説を繰り返した。⁽³²⁾ 彼はまず、或る分子の運動は次の(A)(B)二つの様式で伝達されるのだという。

(A) 最初、隣の分子との間にあるエーテルに伝えられ、次いで、(A-1) エーテルから、先の分子の隣の分子に伝えられる、⁽³³⁾ もしくは、(A-2) 周囲のエーテル中に拡散していく。(A-1)によって伝えられた運動は伝導熱の一部として寄与し、(A-2)によって伝えられた

運動は熱放射となる。

(B)「純粹な伝導」として、分子から分子へと直接に伝えられる。

ティンダルは、熱運動の伝達様式にこの二つがあるとした上で、(A)による伝達量の(B)による伝達量に対する比が小さいほど熱放射が減少し熱伝導が増大するし、さらに、分子が「滑らか」か「丸い」か「重い」かなどによってその比が決まると主張した。「もし分子が滑らかで丸く重いならば、粗い、もしくは凹凸があり、きわめて軽い場合よりも、Aは少なくBは多いであろう。」⁽³⁴⁾

ティンダルのこの議論は、ストークスの批判に対し正面から反論するものというより、むしろ自分の考えを一層明確に定式化し直したものと理解することができる。もともと、(A)と(B)による伝達量の比が重要なのだと強調することによって、それらの絶対量しか問題にしていないストークスに対抗しているのだと考えられなくもないが。

いずれにしても、ストークスはティンダルのこの議論に決して満足せず⁽³⁵⁾、両者の主張は平行線のまま、ティンダルの見解は、先に見たような形で発表されたのであった。

ティンダルは、「ガスと蒸気による熱の吸収と放射について……」を印刷・公表したあとしばらくは、熱伝導力と透熱力との並行関係に言及することはなかった。だが、一八六四年のBakerian Lectureで再びその議論を持ち出した。⁽³⁶⁾そしてその講演を印刷する段になって、レフェリーの一人であったストークスとの間で意見の交換が再開された。

ストークスは、銅は良放射体で同時に良伝導体でもあるという事実があるからティンダルの議論は決して説得的ではないという、他のレフェリーの評言をティンダルに知らせた。⁽³⁷⁾それに対しティンダルは、次のような反論をストークスに書き送った(手紙の中にある図は、本稿の末尾に図1として転載してある)。

私の論文の最後の節をお送りします。そこで私が主張しているのは次のことです。——*abcde*……は、力によって互いに距離を隔てられている一群の原子だとしましょう。その力を、原子を連結する、縦方向に弾性的な棒で目に見えるように表します。振動運動が*abcd*に与えられたとしましょう。その運動は棒を通じて*efgh*に伝わるでしょう、そしてそれから次の原子へとという具合に伝わっ

ていくでしょう。

さて、これらの原子が、この振動運動を受け取り、かつあらゆる方向にそれを伝達することのできる或る媒質中に浸されたとしても、私が思いますに、この媒質が存在することによって、原子から原子への運動の直接の移行が妨害されるでしょうし、また、或る原子がその原子の何らかの物理的性質のゆえに別の原子よりも、媒質に運動を伝達し易いとすれば、そうした前者の種類の原子たちにおいては後者の種類の原子たちにおいてよりも、運動の（原子から原子への）直接の伝達が妨げられるでしょう。⁽³⁸⁾

ここでティンダルは、物質の分子の構成についての具体的モデルを初めて提示している。そしてそのモデルに基づいて、熱放射性と熱伝導性との（負の）並行関係を説明する上で鍵となっている点、すなわち、分子の振動運動が周囲に伝達していく二つの様式について、具体的なイメージを伴った説明を与えているのである。

これに対しストークスは、物体内部での熱伝導や物体からの熱放射のメカニズムについてのティンダルの説明を基本的に承認した上で、ティンダルの提示したこの具体的モデルを逆手にとって次のように反批判した。⁽³⁹⁾

○と●で、質量は同じだが大きさの違う分子を表すことにする（○の方が大きい）。またIとIIで、分子を連結する弾性棒を表すことにする（前者の方が細い）。すると、分子と弾性棒の組合せについては4通りの場合が考えられる（本稿の末尾の図2参照）。ところで、分子がエーテルに伝達する運動は大きい分子においての方が多量であろうし、棒を介して他の分子に伝達される運動は硬い棒による場合の方が多いと考えられる。したがって、（1）は良放射体で不良伝導体、（4）は不良放射体で良伝導体の場合であって、ティンダルの主張に合致するが、「調べてみるまでもなく、図2および図3の場合も図1および図4の場合と同じように生ずると考えられる」、そして（2）および（3）の場合は、それぞれ不良放射体で不良伝導体、良放射体で良伝導体の場合であって、明らかにティンダルの主張に反する、というのである。

ストークスは、また別の機会に、次のような難点も提示してティンダルに追い打ちをかけた。⁽⁴⁰⁾ 或る波長の可視光Aに対しては透明であるが別の波長の可視光Bに対しては不透明であるような物体がたくさん存在する。このことから、「熱放射に関する法則と（可視）光に関する法則との絶対的同一性」を考慮に入れば、熱放射Aに関しては良放射体であるが熱放射Bに関しては不良放射体（あるいはその逆）であるような物

体が存在すると考えられる。ではこのとき、その物体は熱の良導体であろうか不良導体であろうか、とストークスはティンダルに問うた。どちらであると答えても、ティンダルの主張に反する場合を含むではないか、というわけである。

こうしたストークスの批判にもかかわらず、ティンダルは以前の伝導・放射のメカニズムについての考えを基に、「エーテルから大きな抵抗を受けるような分子は、分子から分子へと熱運動を伝える能力は最も小さいに違いない」と従来の自説を固持した。⁽⁴¹⁾ただし、一八六一年の「ガスと蒸気による熱の吸収と放射について……」とは違って、分子から分子への運動の直接的伝達は分子どうしの衝突によってではなく分子間力によるとしている。⁽⁴²⁾

さて、ストークスとティンダルとの間でのこうした批判・反論の応酬は明らかにストークスの側に分のあるものであるが、そうしたことはここでの我々の関心事ではない。我々が注目したいのは次の点である。ティンダルは物質の分子的構成に関する具体的モデルについて、印刷された論文においてこそまったく言及していない——熱の伝導・放射の様式について語るのみ——が、私信においては、論文での公的な記述の背後にある具体的モデルを明かしている。もともと、ティンダルが物質の分子的構成の具体的モデルを初めて示したのは、一八六四年六月である。とはいえ、それまでも、同類のモデル——一群の固体が流体中に浸されており、固体どうしの間での作用の直接的な伝達も何らかの形で（衝突によって、あるいは分子間力などによって）起こる、といったもの——が想定されていたであろうことは想像に難くない。我々にとっても、ティンダルが念頭においていたであろうそうしたモデルを考えて初めて、これまで紹介してきたティンダルの議論がよく理解できるようになるのである。

三の一 モデル^一とモデル^二

アナロジーやモデルについて詳細に論じたヘッセは、モデルを二つの種類に分けた。モデル^一とモデル^二である。彼女の議論およびメラアの議論⁽⁴³⁾を承けて、本稿ではモデル^一およびモデル^二について次のように考えることにする。

たとえば、動き回る一群のビリヤード・ボールを気体のモデルとしているとき、ビリヤード・ボールがすべての点で気体分子と同様であると考えているわけではない。ビリヤード・ボールは赤や白の色をもち固くて光沢があるが、気体分子がそうした性質をもつとは考えられていない。

ビリヤード・ボールにはあるが分子にはないことを知っている諸性質を「アナロジーにおける異質項」と呼ぶ⁽⁴⁴⁾。また運動や衝突は、ビリヤード・ボールのもつ性質であり、まさに分子にも帰属させようとしている性質であるから、これらを「アナロジーにおける同質項」と呼ぶ。さらに、モデルのもつ性質のうち、同質的であるか異質的であるか未だ不明なものを「アナロジーにおける未定項」と呼ぶ。

アナロジーという関係における項をこの3つに分類したとき、モデル¹およびモデル²は次のように定義される。モデル¹は、「アナロジーにおける同質項」と「アナロジーにおける未定項」のみをもつと考えられている存在物である。上記の例に即して言い換えれば、「不完全なコピー（ビリヤード・ボール）から既知の否定的アナロジー（本稿での用語でいえば「アナロジーにおける異質項」を除いたもの⁽⁴⁵⁾）でもある。それに対し、「アナロジーにおける異質項」をもつとされている存在物、それがモデル²である。

モデルに対する上記のような区別を採用すれば、ティンダルが多用したモデルに関して、ティンダルの用いたモデルは同時代の他の科学者にとつてのモデル²であることが極めて多かつた、という特徴を指摘することができる。

ティンダルの用いたモデルはモデル²であることが多かつたということは、先のモデル²（およびモデル¹）の定義からも判るように、いわゆる微視的世界の存在物が巨視的世界の存在物の持つ属性をそのまま具有するとされる傾向がきわめて強かつたことである。微視的世界と巨視的世界とが「重ね描き⁽⁴⁶⁾」の関係にあるのではなく、単に大きさ（スケール）の違いでしかないのである。ティンダルはたとえば、原子の色とか原子の温度についてこそ語らないものの、**原子の表面の粗さ**（そして、それによる**摩擦**）⁽⁴⁷⁾について語っている。これは、当時の原子論者（気体分子運動論者）たちが原子のモデルを単なる弾性球——アナロジーにおける同質項として、弾性衝突をするという性質のみが描定されている球状物体——としていたのと好対称をなしている、といわざるを得ない。そこで次節では、ティンダルは確かに、気体の層と層との間あるいは気体の微小部分どうしの間での摩擦ではなく、一個一個の原子・分子どうしの間での摩擦を考えていたのだということを明らかにしよう。

三の二 原子・分子どうしの間の摩擦

原子どうしの摩擦（原子とエーテルとの間の摩擦ではなく）という考えは、「ガス状物質による熱の吸収と放射について」⁽⁴⁸⁾に見ることが出来る。そこでティンダルは、気体による熱伝導についてのマグヌス(H.G. Magnus)の論文に触発されて、気体の密度と気体分子の易動度(Mobility)との関係について考察している。彼はまず、〇・五気圧の空気で満たした容器Fの一方の側面を熱源に接触させ、Fの反対側の面から放射される熱量を或る方法で測定して、62という値を得た。ティンダルは、この数値で表されただけの熱が容器F内の空気の対流によって、容器の熱源側から放射面側まで運ばれているのだと考えた。ついで容器F内にさらに空気を満たして一気圧としてから、放射される熱量を同様に測定したところ、68であった。

この結果に、ティンダルは次のような考察を加えている。「後者の実験において我々は、熱を担いその熱を運び去る原子の個数を2倍にした⁽⁵⁰⁾したがって、もしこれら二回の実験において原子の速度が同じであるならば、後者の場合には前者の場合の二倍の量の熱が運び去られる筈である。しかし実際にはごく僅かしか増加しなかった。ということは、「密度の大きい空気においては原子の絶対的な速度が希薄な空気の場合よりずっと小さいに違いない」⁽⁵¹⁾。

ティンダルはさらに、次のような数量的な考察までもやってみせてくれる。「奪われる熱量は、一方では〔熱を〕運ぶ粒子の個数に比例するであろうし、他方ではそれら粒子が動く速度に比例するであろう⁽⁵²⁾。したがって、上記二回の実験における原子の速度をそれぞれ v_1 、とすれば、 $62/68 = v_1/2v_1$ であり、したがって原子の速度の比は62:34である。

さて問題は、空気の密度が大きくなると空気分子の速度が小さくなる原因をティンダルが何に求めたかである。ティンダルはそれを分子どうしの摩擦に因るとした。先述の数量的考察に続いて、ティンダルはこう述べる。「この減速は、私の考えでは、空気の粒子が他の空気粒子の運動に対して与える抵抗による以外、生じ得ない」⁽⁵³⁾。「ここでの「抵抗」は、空気粒子どうしの摩擦抵抗を意味しているのであって、空気粒子どうしの衝突の効果が集積して発現する巨視的效果としての抵抗を意味しているのではないことに注意すべきである。この点は、ここに紹介したティンダルの一連の考察が、「マグヌス教授は〔気体〕粒子どうしの摩擦に言及してはいるものの、それが効果を生み出すこととはないと考えている」⁽⁵⁴⁾。

点が不満である、という意見表明から書き始められていることにも明かである。したがって、ティンダルが、「我々は、密度、あるいは密度に伴う内部抵抗が、いかに大きな効果を気体の易動度に対して發揮するかを理解する」⁽⁵⁵⁾ などというときの「内部抵抗 (internal resistance)」もまた、**気体分子**どうしの摩擦抵抗を意味していると理解すべきである。

三の三 原子・分子どうしの間での摩擦 (続)

ティンダルが「気体の内部抵抗」で、気体の層と層あるいは気体の微小部分どうしの間での摩擦ではなく、気体分子一個一個の間での摩擦を考えていたことは、次のことから一層明らかになる。

実はティンダルは、「ガス状物質による熱の吸収と放射について」を発表するに先立って、気体の密度と気体分子の速さとの関係についてストークスと議論を交わしていた。ティンダルは一八六一年の十一月にストークスに宛てて手紙を書き、「ガス状物質による熱の吸収と放射について」に発表することになると本質的に同じ実験について記し、⁽⁵⁷⁾ これまた発表された論文においてと同じように推論して、「(熱を) 運ぶ粒子の平均の速さが、 $\frac{1}{2}$ 気圧の時には一気圧の時の二倍であると結論することは、正しくないでしょうか」と、ストークスの意見を求めた。ティンダルは別の機会にも再びこの点に言及し、密度が高くなると分子の速さが遅くなるのは内部摩擦によるとしか考えられない、と述べた。⁽⁵⁸⁾ だがそれに続けて、「今のよう到大いに悩まされているときには、単純なことから自ら自分を信頼したくない」と述べて、ストークスに或る簡単な質問を發している。さらに、論文「ガス状物質による熱の吸収と放射について」の原稿をストークスに送った後も、「その論文の“対流”についての部分〔すなわち、論文の第十六節〕は、まだあなたに送っていません、もう一度目を通したかったです。」とティンダルはストークスに書き送った。⁽⁵⁹⁾ これらのことからみて、ティンダルは気体の密度と気体分子の速さとの関係についての自分の考えに自信がもてなかったものと思われる。

さて、上記の十二月二十一日付の手紙でティンダルがストークスに發した質問とは次のようなものであった。圧力は同じであるが密度が違う二つの気体を小さな穴から真空中に放出したとき、「弾性力〔すなわち気体の圧力〕は、気体自体の慣性のほかには打ち勝つべき抵抗をまったく受けないと仮定すれば、——すなわち、内部および外部の摩擦がまったく無いと仮定すれば、ある時間内に放出される気体の体積の比はど

うなるか、というものであった。

これに対しストークスは、ティンダルの実験および実験結果の解釈についてはもっと検討のための時間が必要だとして、ティンダルの見解に対する意見の表明は差し控えたものの、ティンダルの十二月二十一日付の手紙でのこの「簡単な質問」には答えた。⁽⁶⁰⁾ 或る圧力の種々の気体が別の圧力状態にある他の容器内に「薄い板に開けられた穴を通して（内部摩擦（internal friction）の効果をできる限り除くために）」放出されるときに放出される速さは、気体が標準圧力にあるときの密度の平方根に反比例する、というのがその答であった。⁽⁶¹⁾

ティンダルは、この手紙でストークスが内部摩擦の効果を除くために薄い板を用いている点に触発されて、我々にとって非常に興味深い議論を展開することになった。⁽⁶²⁾ それは、T・グレーム（Thomas Graham）のいう *effusion* と *transpiration* に関するものであった。グレームは、薄い板に開けられた小さい穴を通して気体を放出する実験と、長くて毛細管のように細い管を通して気体を放出する実験とを行い、放出の速度がこの両者でまったく違うことを見いだしていた。この実験およびその結果に対し、ティンダルは次のような解釈を与えるのである。

彼はまず、*transpiration* の場合には主として「外部抵抗」が関与し、*effusion* の場合には「内部抵抗」が関与するのだと主張する。そして *transpiration* の場合について次のように言う。「毛細管が、ちょうど気体の二つの原子が並んで通れる太さであるとしよう。すると、この二つの原子は同じ力で動かされるので、一方が他方に対して滑るといった傾向は生じず、その結果、これら原子が管内を通るときに受ける抵抗はすべて、管壁を滑ることに由来する、ということになろう。」彼自身の比喩によれば、足の速さ、体力、進もうとする意欲が同じ二人の人間が狭い通路の入口で横並びになったとすれば、二人の間でどちらかが先に進むという動きが生ずることはなく、二人は並んだまま出口まで進むのと同じである。要するに、*transpiration* の場合に気体分子が受ける抵抗はすべて気体分子以外からの抵抗であるが故に、「外部抵抗」だというわけである。

それに対し *effusion* の場合には、小さな穴にやってきた気体分子は、「すばやく他の分子の右、左に去っていく」ので、このときに分子どうしの摩擦、すなわち「内部抵抗」が働くのだという。再びティンダル自身の比喩を借りれば、*effusion* とは劇場から出てくる観客たちが、出口扉の所で肘で押し合うのと同じである。

effusion と *transpiration* にはそれぞれ「内部抵抗」「外部抵抗」が関与しているとしたティンダルは、ついで、*effusion* の場合に気体の流出速

度が気体の密度を高めていってもほとんど変化しないという事実が、内部摩擦は圧力にはほぼ比例して増加すると考えることによつて説明できないだろうかと考え、この点についてストークスの意見を求めた。気体の内部摩擦が気体の圧力に比例するならば、気体分子の速さが気体の圧力（密度）に反比例するという先の推測とも整合的である、とティンダルは考えたのであろう。

以上のティンダルの議論から判るように、ティンダルが「内部抵抗」と言うとき、彼は明らかに原子・分子どうしの摩擦抵抗のことを考えているのである。

このように原子・分子どうしが摩擦力を及ぼしあうと考える点に、そしてまたその摩擦力が原子・分子の粗さに起因すると考える点に、ティンダルのモデルがモデル⁽²⁾の性格を強く帯びていることが示されている。摩擦あるいはその原因としての粗さという、マクロ物体に対して適用される概念をそのままミクロな原子や分子に充当しているのだからである。

ティンダルの用いたモデルはモデル⁽²⁾であることが多く、したがつて微視的世界と巨視的世界とは単に大きさ（スケール）の違いでしかないのであった。ティンダルが、振動する原子を思い描くことが振動する砲弾を思い描くこと以上に難しいということはないし、光エーテルで満たされた空間を思い描くことがゼリーで満たされた空間を思い描くこと以上に難しいということもない⁽⁶³⁾という例を挙げて、「知性にとつて大と小の間に違いはない⁽⁶⁴⁾」と強調するとき、その発言は、単に難易の違いがないことを主張しているのみならず、質的な違いがないことも含意しているのである。

四 ティンダルの科学講演とモデル・アナロジー

微視的世界の存在に対するティンダルのモデルは、巨視的世界の存在そのままであることが多かった。言い換えれば、微視的世界に巨視的世界の存在をただスケール・ダウンするだけで持ち込まれる傾向が強かった。

たとえば、導線中でのジュール熱の発生に関してこう言う。「我々は、電流の通り路に原子が障害物として身を投げ出し——電流がそれら原子に衝突して運動を原子に与え、導線を熱くする——と考えることができよう⁽⁶⁵⁾。」物理的過程の感覚器官への作用について、たとえば光波の網

膜への作用については次のように言う。エーテル波は「瞳の中に入り、眼球を横切って、眼の後ろにある網膜にぶつかって碎ける。それは、忘れないで頂きたいのだが、海の波が海岸で碎けるのと同じようにリアルであり、まさに力学的なのである。」⁽⁶⁶⁾さらに感覚の生起についても次のように言う。エーテルの運動は「網膜に伝えられ、次いで視覚神経に沿って脳に伝えられ、そこで意識にとって光として現れるのである。」⁽⁶⁷⁾

さて、微視的世界に巨視的世界の存在がそのまま持ち込まれるために、我々はともすれば、微視的世界についてのティンダルの叙述はきわめて「通俗的」あるいは「粗雑」である、という印象を抱きがちである。しかしながら、彼の議論が我々にとっていかに「通俗的」、「粗雑」あるいは「ナイーブ」に見えようとも、反面では、その巨視的・日常的世界との連続性のゆえに、聴衆・読者に対する説得力・教育的効果には実に大きいものがあつたと考えられる。

ティンダルが講演が得意・上手であつたことは、彼の存命中からすでに指摘されていたことである。たとえば、ティンダルは一八七二年十月から四カ月間アメリカの七都市で三五回におよぶ一般向けの科学講演をして毎回聴衆に多大の感銘を与えた。⁽⁶⁸⁾彼のニューヨークでのある講演について新聞は、「彼は、言うに言われぬ美しいものを見せると約束してうまく聴衆を固い椅子の上に座らせ、科学を親しみやすいものにしてくれる。一口に言って、彼こそまさに理想的な科学教師である。」⁽⁶⁹⁾と絶賛した。

ティンダルの講演に対するこうした個々の反応とは別に、次の事実にも目を向ける必要がある。そもそもティンダルをアメリカへ講演に招いたJ・ヘンリー (Joseph Henry)⁽⁷⁰⁾の意図は、純粹科学に対する人々の関心をかき立て、純粹科学の研究に対し社会から種々の支援を取り付けようとするにあつた。一般向けの科学講演によってその種の効果を生み出すためには、うまい講演者でなければならぬ。ティンダルはそうした講演者として招かれたのである。ということは、彼の講演のうまさ、大西洋をこえてアメリカにおいても知られ認められていたということにはかならない。そしてティンダルも、光という視覚的で華々しいテーマを取り上げ、ロイアル・インスティテューションで製作したデモンストラーション実験用の装置と2人の実験助手を伴って渡米し、おまけに、講演での収益金をアメリカにおける「理論的科学的発展と、とりわけ物理学科での独創的研究の促進」⁽⁷¹⁾のための基金として寄付し、招待者たちの期待に応えたのであつた。

さて問題は、ティンダルが講演がうまいと評されたのはなぜか、ティンダルの講演が多くの聴衆を魅了したのはなぜか、である。

ティンダルは「ちょっとした役者」⁽⁷²⁾であり、彼の講演が「見せ物的なスタイル」⁽⁷³⁾をとることが少なからずあったことは事実である。あるいはまた、テイラーが論じているように⁽⁷⁴⁾、彼は講義で主題としている事象を、明瞭に、しかも鮮烈な印象を与えるような形で聴衆に示すのに長けていた。さらに、実験台から遠く離れたところにいる人にもはつきり見たり聞いたりできるように、あるいはロイアル・インスティテューションの半円形に配置された客席のどの位置から見えるように、実験の方式を工夫することにも努力を惜しまなかった。彼はまさに、「物理学に対してのみならず、自分の行うデモンストレーションの美しさと同確さに対する、ふつふつと沸き立つような情熱」⁽⁷⁵⁾をもっていたのである。

これらの点のいずれもが彼の講演の高い人気に寄与したことは間違いないであろう。だが、もっと講演の内容に関連した魅力ないし特徴もあったのではなからうか。

ティンダルのモデル・アナロジーについてその特徴を考察してきた我々としては、次の点を指摘することができる。ティンダルは、単に一般的に話術やデモンストレーション（実験）がうまかったのではなくて、科学におけるミクロの世界を彼一流のアナロジーによって——すなわち単なるスケール・アップによって——拡大してみせるのがうまかったのだ、という点である。彼は、聴衆・読者をして「知性（intellect）という望遠鏡」⁽⁷⁶⁾を覗かせるのが巧かったのである⁽⁷⁷⁾。

この点を資料的に裏づけることには原理的な困難が伴う。なぜなら、ティンダルの講演をうまいと評した人たちは自身が、なぜそう評するのかを自覚しているとは限らないし、また他人にそれを語っているとも限らないし、仮に語っていても、それが虚偽の意識である可能性もあるからである。だが、次の事実が、少なくとも傍証とはなるであろう。

ティンダルは一八六四年六月十日にロイアル・インスティテューションで、「磁気に関する実験について」と題した講演を行った⁽⁷⁸⁾。その講演でティンダルは、物体を磁化した時に観察される巨視的な短縮を徹底的な過程から説明し、その徹視的な過程をアナロジーによってスケール・アップした巨視的な過程を提示する（デモンストレーション）、ということを行ったのであった。その講演が、ミクロの世界をアナロジーによって拡大してみせるという手法のゆえに、聴衆に深い感銘を与えたであろうことが、J・ハーシエルの発言から窺える。

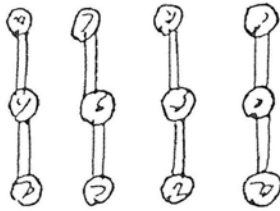
ハーシエルはこの講演の現場に居合わせなかったのであるが、「磁気に関する実験について」を含めて3編の論文が手元にティンダルから送

られてきた。そしてハーシエルは、「それらの論考はきわめて面白く、説明のために為された実験は、幸運にもそれらを見た人々に、強い印象を与えたに違いない」とティンダルを賞賛した。⁽¹⁹⁾

ハーシエルはさらに、「鉄の棒の長さの変化および液体中で鉄の細片が平行に並ぶことについての見事な実験のおかげで、筋肉の作用についての仮説的な説明のことを思いだした」と手紙を続けている。その仮説的な説明とは、ハーシエルがイギリス科学振興協会のある大会で、だれかの論文についてのディスカッションの中で、黒板を用いて口頭で表明したものである。その仮説は、この手紙でのハーシエル自身による表現によれば、次のようなものであった（本稿の末尾の図3参照）。

彼はまず、筋肉繊維は回転楕円体状の粒子が連なってできていると考える。但し、それら粒子はお互いに直接に触れ合って連なっているのではなく、粒子をびったりと包む、引き延ばされることのない輪の中に入っているのだとされた。さらにこれら回転楕円体のそれぞれが、「電流を運ぶ螺旋状の神経繊維」の影響下で、短軸方向に磁化されるものと考ええる。すると、彼が言うには、神経に電流が流れていないときに図Aのように並んでいた筋肉繊維の粒子が、神経に電流が流れるとBのように並び、筋肉繊維が縦方向に収縮する、というのである。

この説明の当否は、ここでは問題にする必要がない。我々が注目したいのはただ次の点である。ティンダルは先の講演で、物体を磁化した時に観察される「巨視的な短縮を微視的な過程から説明し、その微視的な過程をアナロジーによってスケール・アップした巨視的な過程をデモンストラーションした。他方ハーシエルは、そうしたティンダルの実験を読んで、筋肉繊維の収縮について微視的な過程から説明する仮説のことを思いだした。こうした事情を総合的に勘案すれば、巨視的な過程と微視的な過程とをアナロジーでつなぎ実験で具体的に示してみせるといふティンダルの手法こそが、ハーシエルに大きなインパクトを与えたのだと言えよう。したがって、「説明のために為された実験は、幸運にもそれらを見た人々に、強い印象を与えたに違いない」というハーシエルの発言はティンダルのアナロジーに基づいた手法に関するものである、と解するのにも不当ではなからう。



☒ 1



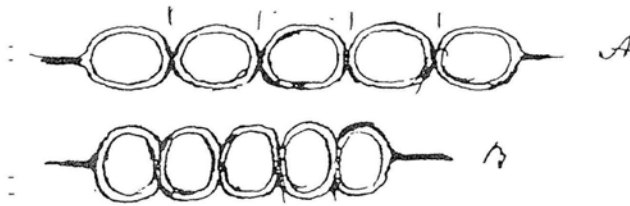
☒ 2

(1)

(2)

(3)

(4)



☒ 3

注と文献

- (1) イギリスの科学者(一八二〇—一八九三)。微粒子による光の散乱(ティンダル現象)、結晶体の磁気的性質、熱放射などについての研究で知られる。
- (2) Sugiyama, S., "The Significance of Particulate Constitution of Matter in John Tyndall's Physical Researches", in *Abstracts of the VIII International Conference of History of Science*, 1989. この点についての詳細は別の論文として準備中である。なお、この「広範な科学活動」とは、水河学、物理学、化学、生物学など彼の広範囲にわたる研究領域を指すのではなく、実験室での研究だけでなく他の科学者との論争や講演活動など彼の科学者としての多様な活動を指している。
- (3) 彼はそれを、ある時期ある文脈では原子、また別の時期・文脈では分子、あるいは粒子と呼んだ。
- (4) Hesse, Mary B., *Models and Analogies in Science*, Univ. of Notre Dame Press, 1970 (邦訳『科学・モデル・アナロジー』培風館)；Mellor, D. H., "Models and Analogies in Science: Duhem versus Campbell?" *Isis*, 59 (1968), pp. 282—290. Leatherdale, W. H., *The Role of Analogy, Model and Metaphor in Science*, American Elsevier Publishing Co., 1974; Black, M., *Models and Metaphors: Studies in Language and Philosophy*, Cornell University Press, 1962.
- (5) じれんば・デュヘムが挙げている例でも、Duhem, Pierre, *The Aim and Structure of Physical Theory*, Princeton University Press, 1954, p. 96.
- (6) Tyndall, J., *Heat Considered as a Mode of Motion*, London, 1863, pp. 257—8.
- (7) *Ibid.*, p. 258.
- (8) *Ibid.*, pp. 260—.
- (9) Tyndall, J., "On radiation through the earth's atmosphere", Discourse, R. L., 23 Jan. 1863; repr. in Tyndall, J., *Contributions to Molecular Physics in the Domain of Radiant Heat*, London, 1872, 421—424.
- (10) *Ibid.*, p. 421.
- (11) Tyndall, J., *op. cit.*, (6), pp. 244—250.
- (12) Tyndall, J., "The action of rays of high refrangibility upon gaseous matter", Discourse Roy. Soc., 27 Jan. 1870; repr. in Tyndall, J., *op. cit.*, (9), pp. 330—374.
- (13) *Ibid.*, 333—334.
- (14) Tyndall, J., "On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connexion of radiation, absorption and conduction" (Bakerian Lecture, 7 Feb. 1861), *Phil. Trans.*, 151 (1861), pp. 1—36, esp. pp. 33ff. なお、ティンダルは "vapour" を "liquid impenetrable gas" と "gaseous" とを区別している。"gases" を気体ではなくガスと訳出した。以下においても同様の取扱いをする。
- (15) 物体の透熱性とは、熱を、物体中のエーテルの振動という形態で、物体中を透過させる性質であり、それに対し物体の熱伝導性は、熱を、物体を構成する粒子の振動という形態で物体中を伝達させる性質である、と理解されている。
- (16) *Ibid.*, pp. 33—36.
- (17) *Ibid.*, p. 33.
- (18) *Ibid.*: 以下、引用文中の強調は引用者によるものである。

- (19) もっとも、今の場合は接触しての運動の伝達であるから、磁力は必ずしも適切でない、といったようなことはあるが。
- (20) *Ibid.*
- (21) *Ibid.*
- (22) *Ibid.* (11)で、水はエーテルのモデルであり、水中の物体が原子のモデルである。
- (23) *Ibid.*
- (24) *Ibid.*, p. 35.
- (25) *Ibid.*, p. 34.
- (26) そのような成果が、Tyndall, J., "On molecular influences: transmission of heat through organic structures", *Phil. Trans.*, 143(1853), pp. 217—232にある。
- (27) Tyndall, J., *op. cit.*, (14), p. 35.
- (28) *Ibid.*, pp. 35—36.
- (29) 「透熱性」(11)については、注(15)の説明を参照されたい。
- (30) Stokes to Tyndall, 7 May 1861, R. I. MSS T., 20/D7. 8.
- (31) Stokes to Tyndall, 16 May 1861, R. I. MSS T., 20/D7. 9. (この手紙の内容から判断して、ティンダルはストークスの上記五月七日付の手紙に対し反論を送付し、それに対する再批判がこの五月一六日付の手紙であると考えられる。しかしながら筆者は、ティンダルのその反論の手紙の所在を知らない。
- (32) Tyndall to Stokes, 19 May 1861, R. I. MSS T., 20/E6. 3.
- (33) (11)の点において、以前のティンダルの見解(少なくともストークスによつて解釈された限りでの)と違っていると考えざるを得ない。もっとも、ティンダルの見解を変更したとは明記していないが。
- (34) AおよびBは、それぞれ伝達様式(A)および(B)により伝達された運動の量である。
- (35) Stokes to Tyndall, 7 June 1861, R. I. MSS T., 20/D7. 1.
- (36) Tyndall, J., "Contributions to molecular physics: being the 5th memoir of 'Researches on Radiant Heat'" (Bakerian Lecture, 17 March 1864), *Phil. Trans.*, 154 (1864), pp. 327—368.
- (37) Stokes to Tyndall, 24 June 1864, R. I. MSS T., 20/D9. 21.
- (38) Tyndall to Stokes, no date, Camb. Univ. Library Stokes Collection, RS477. なおティンダルは、"On the absorption and radiation of heat by gases and vapours...", *op. cit.*, (14), p. 36では分子から分子への運動の直接の伝達を分子どうしの衝突によるとしていたが、(11)では分子間力によるとしている。
- (39) Stokes to Tyndall, 30 June 1864, R. I. MSS T., 20/D9. 22.
- (40) Stokes to Tyndall, 15 September 1864, R. I. MSS T., 20/D9. 23.
- (41) Tyndall, J., *op. cit.*, (36). 引用は p. 367 である。
- (42) *Ibid.*, p. 366. (11)の修正の背景については、準備中の別稿で論ずる。

- (43) Hesse, M.B. *op. cit.*, (4), pp. 7-11; Mellor, D. H., *op. cit.*, (4).
- (44) ヘッセはこれを「否定的アナロジー (negative analogy)」と呼んだのであるが、Mellorもいうように、「アナロジーとは本来関係のことであり、これはむしろ negative analogue と呼ばれるべきものである。そこで本稿では、「アナロジーにおける異質項」と呼ぶ。
- (45) Hesse, M.B., *Ibid.*, p. 9.
- (46) 大森莊蔵『言語・知覚・世界』、岩波書店、一九七一年、第十一章など。
- (47) Tyndall, J., "On the Absorption and Radiation of Heat by Gaseous Matter: Second Memoir", *Phil. Trans.*, 152 (1862), pp. 59-98 の或る箇所 (p. 81 など) では、原子の形状 *x* も考えている。
- (48) *Ibid.*, §15 (pp. 96-98).
- (49) 以下の議論では、測定された値の比だけしか関係しないので、ここでは、測定方法について言及しない。
- (50) *Ibid.*, p. 97. ここでティンダルは熱を、あたかもかつての熱物質説が考えていたように、物質のごとくに扱っている。以下の数量的考察においても同じことが言える。しかし、ティンダルは、別に熱物質説を信奉していたわけではない。
- (51) *Ibid.*
- (52) *Ibid.*
- (53) *Ibid.* 強調は引用者。
- (54) *Ibid.*, p. 96. 強調は引用者。
- (55) *Ibid.*, p. 97.
- (56) Tyndall to Stokes, 15 November 1861, R.I. MSS T., 20/E6.4.
- (57) ただしこのときは、空気の圧力が $O \cdot 5$ 気圧の時も一気圧の時も空気の対流による冷却は同じであったとしている。
- (58) Tyndall to Stokes, 21 December 1861, R.I. MSS T., 20/E6.5. このときは空気分子の速さの比を $0.4 : 3$ としており、前回の手紙での結果と違うし、発表された論文での結果とも、若干ではあるが、食い違っている。もっとも、前回の手紙での「二倍」は「ほぼ二倍」の意であったと解することもできるが。
- (59) Tyndall to Stokes, 29 December 1861, R.I. MSS T., 20/E6.6.
- (60) Stokes to Tyndall, 27 December 1861, R.I. MSS T., 20/D8.13.
- (61) ティンダルのもともとの問題意識からすれば、十二月二十一日付の手紙でティンダルが定式化しているように密度が異なる別の気体の流出速度の比較ではなくて、同一の気体で密度が異なるときの流出速度の比較こそが問題にされるべきと思われる。ストークスもこの手紙に追伸を付し、「あなたの質問の趣旨を誤解したのではないかと危惧するので」として、後者の場合についての答も与えている。
- (62) Tyndall to Stokes, *op. cit.*, D59).
- (63) Tyndall, J., *op. cit.*, (6), p. 250.
- (64) *Ibid.*

- (65) *Ibid.*, pp.211—212.
- (66) *Ibid.*, p.250.
- (67) *Ibid.*, p.250—251.
- (68) Sopka, K. R., "John Tyndall: International Populariser of Science", Brock, W. et al. (eds.), *John Tyndall: Essays on a Natural Philosopher*, The Royal Dublin Society, 1981, pp.193—203. *Lectures on Light Delivered in the United States in 1872-73* は「そのアメリカでの講演や著したもののことである」。
- (69) *New York Daily Tribune*, 18 December 1872, p.1; quoted in Sopka, K.R., *Ibid.*, p.196.
- (70) ティンダルがアメリカへ講演旅行に出かける決心をしたのは「Joseph Henry, Louis Agassiz, F.A.P. Barnard, Frederick D. White, Ralph Waldo Emerson」の十五人連名の招待状によってであった。Sopka, K.R., *Ibid.*, p.195 and p.198.
- (71) Sopka, K.R., *Ibid.*, p.199.
- (72) Thompson, D., "Contributions to Scientific Education and the Teaching of Science", Brock, W. et al. (eds.), *Ibid.*, pp.145—156. 同書 p.149-46°。
- (73) Sopka, K.R., *op. cit.*, (68), p.196.
- (74) Taylor, C.A., "Tyndall as Lecture Demonstrator", Brock, W. et al. (eds.), *Ibid.*, pp.205—216.
- (75) *Ibid.*, p.213.
- (76) Tyndall, J., "On the Physical Basis of Solar Chemistry", Discourse R.I., 7 June 1861; repr. in Bragg, W. L. and Porter, G.(eds.), *The Royal Institution Library of Science: Physical Sciences*, Vol. 1, Elsevier Pub. Co., pp.381—389. 引用は p.383-46°。
- (77) 「」で「聴衆・読者をして望遠鏡を覗かせると表現したのは、聴衆・読者は各自の「知性という望遠鏡」を使って微視的世界を見ているのだからである」。
- (78) Tyndall, J., "On a magnetic experiment", repr. in Tyndall, J., *Researches on Diamagnetism and Magneto-Crystalline Action, Including the Question of Diamagnetic Polarity*, London, 1870, pp.241—250.
- (79) Herschel to Tyndall, 18 June 1864, R.I. MSS T., 10/F8, 13.

Analogy and Model in John Tyndall's Scientific Work

Shigeo SUGIYAMA

John Tyndall attempted to explain most natural phenomena in terms of atomic or molecular processes. In many cases he made the most of analogical reasoning. Analogical reasoning was, for him, a means to investigate the invisible through the visible. Most models he utilized were, in their nature, models₂ rather than models₁, as M. Hesse defined them, as compared with those used by his contemporary scientists. This nature of his models, which were used in his popular lectures on science as well as in his scientific investigations, contributed to make his lectures well-liked among non-scientists.