

『光学』におけるニュートンの物質観

安池 智 一¹⁾

Newton's perspective on substances in his "Opticks"

Tomokazu YASUIKE

1 はじめに

I. Newton (1642-1727) は、その著書『プリンキピア』(1687)によって力学体系を完成に導いた数理論理学者としてその名声を誇っている。プリンキピア自体は幾何学で表現される一方で、現代で言う微分法・積分法を考案したことで広く知られているであろう。これらのことからNewtonの才能は、数理面にその特徴があると考えられやすい。しかしながら、Newtonには優れた実験科学者としての一面もあった。それが遺憾なく発揮されているのがもう一つの著書『光学』(1704)である。『光学』の主題は色である。彼は太陽の白色光が様々な屈折性を持つ光の混合物であることを、よくデザインされた実験によって鮮やかに証明した。実験結果からは示そうとした結論以外を導くことができないような実験、いわゆる“決定実験”の端緒を開いたものとして、実験科学のお手本にもなっている。

光の屈折性の違いは今の言葉で言えば光の波長の違いに対応するから、この実験はプリズムなどの分散素子によって、光を波長ごとに分解できることを示したものであった。つまりこの実験は分光学の出発点を与えるものであったと言える。『光学』出版からおおよそ一世紀後のJ. von Fraunhofer (1787-1826)による太陽スペクトル中の暗線の系統的な研究を契機として、本格的な分光学が始まる。R. Bunsen (1811-1899)とG. Kirchhoff (1824-1887)の研究によってスペクトルによる化学分析が確立し、分光学による新元素(Cs, Rb)の発見も行われた。そして水素原子の可視スペクトル(Balmer系列)についてのN. Bohr (1885-1962)の議論はついに、ミクロの世界の力学——量子力学建設の扉を開くこととなる。その意味で『光学』は原子や分子、物質一般の基礎理論につながる最初のマイルストーンであったということが出来る。しかし

ながら、『光学』からFraunhoferまでは百年弱の開きがあるから、直接の影響をそこに見ることはできない。

一方、Newtonの『光学』は別の側面でやはり物質科学に大きな影響を、それも直接同時代的に与えている。それは『光学』の最後に記されたQuery 31の存在のためである。その冒頭を見てみよう*。

物質の微小粒子にはある能力、効能、もしくは力があり、それによって、ある距離を隔てて光の射線に作用して、それを反射、屈折、回折させるばかりでなく、物質粒子同士も互いに相互作用し合っており、自然現象の大部分を生じるのではないか。なぜなら、物質が重力、磁気および電気の引力によって互いに作用し合うことはよく知られているが、これらの例は自然の進路と過程を示しており、またこれら以外にもまだ引力が存在することも、ありえないことではないことを示しているからである。つまり、自然はきわめてよく自らに一致し、自らに倣うからである。(中略)重力や磁気や電気の引力は、きわめてよく感知される距離まで達するので、一般の人々の眼によっても観察されてきた。しかし、きわめて小さい距離にしか達せず、これまで観測にかからなかった他の引力もあろう。おそらく電氣的引力は、摩擦によって惹きおこされなくても、このような小さい距離に達するのであろう。

答えを知らないでいて、どうしたらここまで正しいことを推論できるのか驚くほどの内容である。そして、以下の内容がこれに続く。

酒石塩が潮解によって溶けるのは、酒石塩の粒子と、上記として空気中にたどる水との引力によるのではないか。普通の塩、または硝石、または

¹⁾ 放送大学准教授 (「自然と環境」コース)

* 以下すべての本文の引用および見出しは [1] による。

礬〔硫酸塩〕が潮解によって溶けないのは、このような引力がないからではないか。(中略) 強水〔濃硝酸〕もしくは礬精〔希硫酸〕を鉄のやすり屑に注ぐと、大きな熱と起沸とを伴ってそれを溶かすが、この熱と起沸は粒子の激しい運動によって惹きおこされるのではないか。そしてその運動は、液体の酸粒子が鉄の粒子に激しく突進し、その細孔の中に力づくで入り込んで、鉄の最も外側の粒子と本体の塊との間に割り込み、これらの粒子をとりかこんで本体から解放し、水中に自由に浮遊させることを示しているのではないか。

冒頭の「物質粒子間の力」という考えに基づき、具体的な物質を例に挙げながらの記述である。これ以降も様々な化学反応が次々に例として挙げられていく。この明確なビジョンと具体性は広く同時代の“ケミスト”たちに迎えられ、化学反応の化学親和力に基づく理解へと結実することとなったのである。つまり『光学』は分光学と化学親和力の探求という2つの側面を通じて物質科学の発展に大きく寄与したとすることができる。そのように考えたとき、なぜ『光学』の最後に物質粒子間の力や化学反応の詳細な記述が書かれるにいたったかが、素朴な疑問として浮かび上がってくる。本稿の目的は、その答えを『光学』の内容および成立の経緯から推測することにある。

2 『光学』の構成と内容の概要

まず『光学』がいかなる内容を持っているかを以下に整理しておく。

2.1 第I篇

第I篇は『光学』の内容として広く知られている重要な部分であるので、その内容を以下でやや詳しく見ておこう。第I篇は第I部および第II部からなる。『光学』の全体を通じて、Newtonが議論したいことからは**命題**の形で提示されるが、第I篇第I部に限ってはそれらに先立って**定義**と**公理**が存在する。

2.1.1 第I篇 第I部 定義

定義にはIからVIIIまであり、光の射線(I)、射線の屈折(II)、反射(III)、入射角(IV)、反射角と屈折角(V)、入射、反射および屈折の正弦(VI)、均質、不均質な光(VII)、単色と複色(VIII)が定義されている。定義I、VII、VIIIは重要であるのでそれぞれ一部を抜粋しておこう。

定義I

光の射線とは、光の最小粒子であって、異なる直線上で同時に存在するばかりでなく、同一の直線上で相継いで存在するものとする。

Newtonは『光学』において必ずしも一貫した立場として粒子説を主張してはいなかったが、冒頭にこれがあることにより、粒子説をとったとされることが多い。

定義VII

射線がすべて等しい屈折性をもつ光を、私は単純、均質、同質とよぶ。また射線のあるものが他のものより屈折性が大きい光を、複合、不均質、異質とよぶ。

Newtonはプリズムを用いた屈折の実験によって光の本性をあぶり出す。現代的には「屈折性」は「波長」と対応し、Newtonは電磁波としての光を特徴づけるのに最も適切な光の性質に注目したと言える。

定義VIII

均質光の色を、私は原色、均質色、単色とよび、不均質光の色を、不均質色、複合色とよぶ。

我々人間は光の波長の違いを色の違いとして知覚するから「等しい屈折性をもつ光」は単色、「様々な屈折性をもつ光」は複合色であるということになる。これ自体、第I部の命題で実験を通じて示されることからであるから、この定義は内容に先立って用語を整理するために置かれたものと言える。

2.1.2 第I篇 第I部 公理

公理はR. Descartes (1595-1650) の『屈折光学』をはじめとして、Newton以前に広く認められていたことのまとめとなっており、以下のIからVIIIで構成されている。(I) 反射角と屈折角は入射角と同一平面にある、(II) 反射角は入射角に等しい、(III) 屈折射線は入射点に戻されると入射線を逆にたどる、(IV) 射線がより密な媒質へ入るとき屈折角は入射角より小さい、(V) 入射正弦と屈折正弦の比は一定、(VI) 反射・屈折する平面・球面は各点対象と同数の点像を生じる、(VII) 収束する射線は像を生じる、(VIII) 発散する射線は発散してくる元の場所に像を生じる、の合計8つである。

2.1.3 第I篇 第I部 命題

先に述べたようにNewtonが議論したいことは**命題**として提示される。第I篇第I部の命題は、屈折性の違いによる光の分解に関するもので、具体的な内容の見出しは以下の通りである。

- (I) 色の異なる光は屈折性の度合いも異なる。
- (II) 太陽の光は屈折性の異なる射線からなる。
- (III) 太陽の光は反射性の異なる射線からなり、他より屈折性の大きい射線は、他より反射性が大きい。
- (IV) 複合光の不均質射線の分離。
- (V) 均質光は規則的に屈折される。
- (VI) 各射線の入射正弦と屈折正弦は、与えられた比になる。
- (VII) 望遠鏡の完成を妨げるのは、射線の屈折性の差異である。
- (VIII) 望遠鏡の短縮。

これらの命題について、Newtonは専らプリズムとスリットを用いた実験によってその内容を実証していく。実験の設定および結果についての記述は詳細で、

読者が追試を試みるのに十分な情報を含んでおり、いわゆる実験の論文としての理想的な記述が貫かれている。一方で、立論はすべて実験のデザインとその結果によっており、数理的な仮説演繹に基づく議論は見られない。

命題Ⅰにおいて、我々が色の違いとして知覚する光の属性は、プリズムによる屈折角によっても区別されることが実験的に示される。いまの言葉で言えばその属性は波長である。このことを踏まえると、プリズムによって太陽光が“七色”を呈するという当時も広く知られていた事実は、命題Ⅱ「太陽光は複合的である」ということと対応することになる。命題Ⅲは意味を取りにくい、プリズムに入射した光の全反射についての記述である。プリズム内の射線は空気との境界で一部は屈折し、一部は反射する。このとき全反射の臨界角 θ_c はプリズムの屈折率を n として

$$\sin \theta_c = \frac{1}{n} \quad (1)$$

で与えられる。屈折率が大きいほど臨界角は小さくなり、広い入射角の範囲で完全反射を示す。このことを指してNewtonは「屈折性の大きい射線は反射性が大きい」と言っている。現代的な言い方をすればこれは、「波長が短くプリズムでより大きく屈折する光は、より広い入射角の範囲で完全反射を示す」ということと対応し、もちろん、その内容は今でも正しい。命題Ⅳは実験上の工夫に相当する部分で、入射光をあらかじめ小孔で絞っておくことでより鮮明なスペクトルが得られることを議論している。命題Ⅴはやや意味が取りにくい、一度プリズムで分けられた均質光を再度プリズムに入射しても、さらに広がってスペクトルを与えることはないという意味である。命題Ⅵはすでに公理Ⅴとして知られていた屈折の法則

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_r}{n_i} \quad (2)$$

は当然、屈折性の異なる射線ごとに決まった比となるという形に拡張しなくてはならないことを指している。上式で θ_i 、 θ_r はそれぞれ入射角および屈折角、 n_i 、 n_r はそれぞれ入射側および屈折側の媒質の屈折率を示している。

命題Ⅶでは望遠鏡の設計について議論されている。当時すでに屈折望遠鏡の像が不先鋭となる理由として、通常用いられるレンズが球面であることが挙げられていた。球面レンズの場合、その中心を通る光と周辺を通る光は同じ位置で結像することができない。この「球面収差」は例えばレンズ表面を円錐曲線となるように磨くことで除去されると考えられていたが、Newtonはそれでは不十分であるとした。つまり、上記の命題によれば光はその色ごとに異なる屈折を示すため、結像位置は色ごとに異なるはずであるから、レンズを用いた望遠鏡（屈折望遠鏡）には球面収差に加えて「色収差」が存在することになる。このため

Newtonは屈折現象を用いない、鏡を用いた望遠鏡（反射望遠鏡）の方が優れていると考え、実際に望遠鏡を製作した。また、命題Ⅷでは、凹面主鏡で反射された光を光軸上に斜めに置いた平面の副鏡で鏡筒の外に導く構造をとることによって、焦点距離に対して鏡筒をコンパクトにすることができることを示した。命題Ⅶ、Ⅷによる望遠鏡はNewton式反射望遠鏡と呼ばれている。この望遠鏡の製作によってNewtonは若くして王立協会の会員に推挙された。

2.1.4 第Ⅰ篇 第Ⅱ部 命題

第Ⅰ篇第Ⅱ部の命題は屈折性に基づいた色に関するもので、具体的な内容の見出しは以下の通りである。

- (Ⅰ) 屈折光または反射光によって生じる色は、光と影の境界の変化による光の変改からくるのではない。
- (Ⅱ) 均質光は屈折性の度合に応じて固有の色をもつ。その色は屈折、反射において不変である。
- (Ⅲ) それぞれの色に対応する均質光の屈折性の決定。
- (Ⅳ) 複合によって、均質光らしく見える色を作ることができるが、その色に不変性はない。多くの色を複合すると、ついには白か灰色になる。
- (Ⅴ) 太陽光の白さは、すべての原色が一定の比率で複合されたものである。
- (Ⅵ) 混合している各原色の量と質が与えられたとき、その複合色を知ること。
- (Ⅶ) 光によって生じ、想像力によらない宇宙のすべての色は、均質光の色か、その複合かのいずれかである。
- (Ⅷ) プリズムによって作られる色の説明。
- (Ⅸ) 虹の色の説明。
- (Ⅹ) 天然物の永久色の説明。
- (Ⅺ) 色光を混合して、太陽光と同じ色と性質の光束を複合する。

命題Ⅰは現代の我々にはわかりにくい内容であるが、それは当時信じられていた議論がNewtonによって完全に否定されたために、我々がその議論を知らないことによる。当時の色彩論はアリストテレスの『感覚論』によるもので**変化説**と呼ばれる。この説では、色は白色光が媒質を通過することによって暗くなるときに発生すると考えられ、明るい方から暗い方へ「白、黄、赤、堇、緑、青、黒」の順で色が変化していくとされた。これが「光と影の境界の変化による光の変改」と呼ばれているものの内容であるが、これが第Ⅰ篇第Ⅰ部の実験で示されたことと矛盾することは明らかである。

命題Ⅱ「均質光の固有の色は屈折、反射において不変」については、プリズムで分けた光の一部をスリットで切り出し、再度プリズムや鏡に入射してもその色は変化しないこと、また、そのような選ばれた均質光を白色光の元で様々な色に見える物体（紙、灰、鉛丹、雄黄、藍、バイス、金、銀、銅、草、青い花、

堇、孔雀の羽など)に当たるときにいずれも照射した均質光の色に見えた(違いは反射の度合いのみであった)ことから、真であるとされた。

命題Ⅲには「赤、橙、黄、緑、青、藍、堇」の“七色”に相当する射線の(ガラスから空気への)屈折正弦の値の範囲の測定値の報告がある。命題Ⅳでは、均質光を混ぜることで別の均質光に見える光を作ることができること、しかしながらそれはもちろんプリズムによって分離されることが議論され、多くの均質光の混合によって光は白くなることが示される。これを踏まえて、命題Ⅴでは太陽光の白さも、さまざまな色の均質光の混合物であると結論される。命題Ⅵでは各原色の量が与えられたときに得られる複合光の色が議論される。「赤、橙、黄、緑、青、藍、堇」の七色を円周上に並べ、それぞれの成分の量を加味した重心の位置で混合色が与えられるとする。すべてが同量で混合されたとき、重心は色環の中心に位置し、白色となると考える。これは現代の色彩論の萌芽となるものである。命題Ⅶでは、これまでの命題から総合的に考えて、任意の色は太陽光の中の射線が反射、屈折もしくは他の原因によって、互いに分離または混合されて生じるものとされた。命題Ⅷではスリットの幅がプリズムの大きさと同程度のときにスクリーンの位置に依存した色の出方について議論され、命題Ⅸにおいては虹が生じる理由が考察されている。主虹は空気中の球形の水滴で屈折、反射、屈折して(1回反射)届いた光、副虹は同様に屈折、反射、反射、屈折して(2回反射)届いた光によるものであることが示されている。

命題Ⅹでは天然物の永久色についての議論がある。ここでいう天然物の永久色とは、通常物質の色のことを指している。ここでNewtonは

物質は特定の種類の射線を、その他の射線よりも大量に反射もしくは透過することによって、色を示すのであるが、それらが反射もしくは透過しない射線をそれらの中で止め抑圧するものと考えられる。

との正しい認識を示している。また、その論理的帰結として生じる疑問、すなわち

“有色の物質や液体がある種の射線を反射して、他の種類を導入、あるいは透過させる理由”

は第Ⅱ篇全体を通して議論されることが予告されている。命題Ⅺは、色の実験を行うために用いる太陽光と同じ色と性質の光束を複合する方法についての補足的なものである。

2.2 第Ⅱ篇

2.2.1 第Ⅱ篇 第Ⅰ、Ⅱ部

第Ⅰ篇では、プリズムとスリットを用いた実験によって光の色に関する性質が明らかにされた。残された

問題は、物質がある種の射線を反射し吸収する理由は何か、つまり**物質がもつ固有の色**の問題である。この問題を解く鍵としてNewtonが目にしたのは、いわゆるNewton環(ニュートンリング)であり、第Ⅱ篇の第Ⅰ部にはNewton環に関する観測1~26が示され、第Ⅱ部ではそれらに対する所見が述べられている。NewtonがNewton環に注目したのは、

ガラス、水、空気などの透明な物質は、十分な厚さがあれば、極めて透明で無色に見えるが、吹いて泡にするか、または他の方法で薄層にすると、そのさまざまな薄さに応じて、さまざまな色を呈する。

との観察による(下線筆者、以下同様)。つまり、微細な粒子の集合であると考えられる物質は、その存在が微細であるためにそれぞれの大きさに応じた特定の色を呈するのだと、Newtonは考えた。そして第Ⅱ篇の第Ⅰ、Ⅱ部ではNewton環に関する実験手順とその観測結果およびそれらについての所見がまとめられているが、それらの具体的な内容は本稿の議論に不要であるので、ここでは触れない。内容としては、上記で触れた「透明薄層物質はその厚みに応じた色を呈する」ということに尽きている。

2.2.2 第Ⅱ篇 第Ⅲ部(前半)

第Ⅲ部では第Ⅰ、Ⅱ部で扱った薄層透明物質が示す色についての実験結果を手掛かりに、様々な物質がもつ色(天然物の永久色)について論じている。第Ⅲ部はⅠからⅩまでの全部で20の命題から構成されている。前半の10の命題を以下に示す。

- (Ⅰ) 最大の屈折力をもつ透明物質の表面は、最大の光を反射する。
- (Ⅱ) ほとんどすべての天然物の最小粒子は、ある程度透明である。
- (Ⅲ) 不透明な有色物質の粒子の間には、多くの空間があり、空虚もしくは密度の異なる媒質で満たされている。
- (Ⅳ) 物質を不透明にし、有色にするには、物質の粒子と隙間とは、ある一定の大きさ以下であってはならない。
- (Ⅴ) 物質の透明粒子は、薄層や泡のように、ある色の射線を反射し、他の色の射線を透過する。これが物質のすべての色の原因である。
- (Ⅵ) 物質の色を左右するその粒子は、それらの隙間に充満している媒質より密である。
- (Ⅶ) 天然物を構成する粒子の大きさは、その色から推測できる。
- (Ⅷ) 反射は、普通に信じられているように、物質の固いまたは不透性粒子へ光が衝突しておこるのではない。
- (Ⅸ) 物質が光を反射または屈折させるのは、同一の能力による。
- (Ⅹ) もし光が真空中よりも物質中で、その物質の

屈折の尺度となる正弦に比例して速ければ、光を反射、屈折するその物質の能力は、その密度に比例する。

命題XのあとでNewtonが

これまで述べた命題は物質の本性に関するものであり、…

と述べているように、上記のI～Xの10個の命題は、(物質固有の)色の問題を通じて物質がいかなる存在であるかについて論じたものである。少し詳しく内容を見てみよう。

命題Iは、今の言葉で言えば、式(1)に表されているように、屈折率が大きい物質は全反射の臨界角が小さくより広い入射角の範囲で全反射が起こるということを表す。第I篇第I部の命題IIIでは式(1)と屈折率の波長依存性からの帰結として理解される内容であったが、ここでは

空気と岩塩の境界では、反射は空気と水の境界よりも強く、また空気とダイヤモンドの境界ではさらに強い。もしこれらのうちどれか、および同様に透明な固体を水の中に沈めると、その反射は以前よりはるかに弱くなる。また、よく精留された罌油〔硫酸〕もしくはテレピン油といった、一層つよく屈折する液の中に沈めると、さらに弱くなる。

のように、物質ごとの屈折率の違いを実験に基づいて論じている。また、普通のガラスと水晶、また金属ガラスの屈折率の違いについての観察から、屈折率は物質の密度と関係があることを示唆している。

命題IIでは、顕微鏡観察の際に試料をスライスして薄くすることによって不透明な物質も透明に見えることから、“天然物の最小粒子はある程度透明である”と論じられている。また、物質の不透明性は“内部の粒子にひきおこされる無数の反射から生じる”とされている。

命題IとIIを踏まえて、不透明な有色物質の色から物質の微細構造について論ずるのが命題IIIである。命題IIIでは、“不透明な有色物質の粒子の間には多くの空間がある”とされている。これは、

命題IIによれば、物質内部の粒子によってなされる多くの反射があるが、それは命題Iによると、もしこれらの物質の粒子が、それらの間にいかなる隙間もなく連続していたとすれば、(反射は)おこらないだろうからである。

という推論に基づいている。反射と屈折の波長依存性を色の原因とみることにより、物質の構造が自ずから浮かび上がってくるということになっている。

つづく命題IVでは、有色であるためには、粒子間の距離はあまり近すぎたはいけないとしている。少し奇妙に思われるかもしれないが、これはNewton環の実験において、2つの対物レンズが互いに近く中心部付近には色が生じないことからの類推である。

命題Vでは、物質の色は、薄層や泡のように、ある色の射線を反射し他の色の射線を透過するために生じているとしている。ここでNewtonは

すべての天然物の粒子は、同数の薄板の破片のようなものであるから、同じ理由によって、同じ色を示すはずである

と述べており、孔雀の尾の羽の色、蜘蛛の巣、絹の有色繊維が目の位置を変えるとその色が変わって見えることを論拠としている。Newtonが議論しているのは現代の立場からすれば構造色ということであり、ここに論拠として挙げられたのも構造色の例ばかりである。漸次、構造色以外の色についての議論に進むが、化学反応による色の変化についても議論が及ぶのは興味深い。

さまざまな液体を混合して、はなはだ奇妙で驚くべき色の発生と変化をもたらすことができるのも、私の論旨に合わなくはない。(中略)一つの液体の塩粒子が他の液体の着色粒子とさまざまに作用し、あるいは結合して、それらを膨張あるいは収縮させ(それによって、それらの体積のみならず密度も変えることができる)、あるいは、それらを小さい粒子に分割し(このため有色液は透明になることができる)、あるいはまた、それらの多くを結合して一つの塊とし、それによって二つの透明な液体が一つの有色液をつくり出すというのである。

ここでは、命題Iで議論した屈折率と密度の関係の前提として、化学反応を通じて密度が変化した結果、屈折率が変化して色が変わると考えている。

命題VIでは物質粒子の密度がそれらの隙間に充満する媒質よりも高いとする。これは、もし媒質よりも粒子の密度が低い(屈折率も低い)とすると、屈折角が大きくなるために入射角がわずかに変化したとしても反射された色が変わってしまい、そうすると様々な角度で入射した光があらゆる色で多様に反射して白くなってしまおうという推論による。

命題VIIでは、

物質の粒子は、命題Vにより、等しい厚さの薄板と、もし屈折密度が同じならば、それと同じ色を示すことがほぼ確実だからである。

とあるように、命題Vを前提として、Newton環の色と薄層の厚みの関係を用いれば、物質の色からその構

成粒子の大きさが推定できるとする。

命題Ⅷでは、光の反射は物質中の粒子への光の衝突の結果生じるものではないということが議論されている。色の原因を物質粒子による光の屈折と反射に求めるこれまでの議論と矛盾があるように思われるが、これは、

光がガラスから空気へ進むときには、空気からガラスへ進むときと同じほど強い。(中略) また空気が水やガラス以上に強く反射する粒子をもつことはありそうもないと思われる。(中略)

という観察に基づくもので、だとすれば、以下のように考えなくてはならないというのがNewtonの考えである。

一つの射線の反射は、反射物質の一点によってひきおこされるのではなく、物質の表面全体にむらなく広がっている物質のある力によってひきおこされるのであり、その力によって物質は、直接の接触なしにその射線に作用するのであると。物質の粒子がある距離をおいて光に作用することは、のちに示されるであろう。

そして、物質粒子と光の反射についてのやや相矛盾する考察を仲裁するには、

このことから、物質は普通に信じられているよりもはるかに疎であり、多孔質であると理解してよいであろう。水は金よりも19倍軽く、したがって19倍金よりも疎である。そして金は、極めて容易に何の抵抗もなく磁気素を透過させ、また容易に水銀をその細孔に入れさせ、また水を通過させるほど疎である。

と考える必要があり、そうすることによって

光が透明物質を容易に透過する通路を見出すことができるであろう。

と結論している。また、磁気的な力や万有引力の作用の仕方もこのような見方を支持するものとして、

磁石は、磁性もなく赤熱してもいないあらゆる密な物質、たとえば、金、銀、鉛、ガラス、水を通して、その力を何ら減ずることなく、鉄に作用する。太陽の引力は、諸惑星のすべての部分に、まさにそれらの真の中心まで、あたかもその力が作用する部分が、惑星の本体によって取り巻かれていないかのように、同じ力で同じ法則に従って作用する。

のように対比されている。そして、以上のような物質

の色と物質による光の反射の“説明”と矛盾しない物質の微細構造としてNewtonは以下のような**物質の階層構造**を想定した。

粒子の間隙ないし空虚な空間は、粒子全体と大きさが等しい。そしてまたこれらの粒子は、さらに小さい他の粒子で構成されており、それらの粒子もその間に、それらの粒子のすべての大きさに等しい空虚な空間をもっている。同様にまた、これらのさらに小さい粒子は、さらにはるかに小さい粒子で構成されており、それらをすべて一緒にしたものは、それらの間のすべての細孔または空虚な空間に等しい。このようにして、どこまでも続き、ついにはその内部に細孔または空虚な空間をもたない固い粒子に達する。もし任意の大きい物質の中に、このような粒子の階層がたとえば三つあって、その最小のものが固い粒子とすれば、この物質は固い粒子の7倍の細孔をもつであろう。もしこのような粒子の階層が四つあって、その最小のものが固い粒子とすれば、この物質は固い粒子の15倍の細孔をもつであろう。もし階層が(中略)このようにして際限なくつづく。

命題Ⅸで述べられている反射は全反射のことで、入射角度を変化させたときに臨界角の前後で屈折と全反射が連続的に繋がることを指している。一方、物質が光に及ぼすこの力はNewton環を作るのにも同様に寄与するとされているが、現代的な観点では誤りと言わざるを得ない。

命題Ⅹでは、屈折の界面垂直方向成分の自乗を屈折力と定義し、これが密度に比例することを様々な物質に対して実験を行い、具体的に示している。黄水晶、透明石膏、水晶、氷洲石、普通のガラス(砂を溶融したもの)、アンチモンのガラスと空気については、互いに密度が非常に異なる物質ながらも、屈折力と密度の比はほぼ一定になること、一方で、脂肪質で硫黄質で油質の物質である樟腦、オリーブ油、亜麻仁油、テレピン油、琥珀と(Newtonいわくおそらく凝固した油質の物質である)ダイヤモンドは互いに同じ屈折力と密度の比を持つことが示されている。後者の物質群の方がその比の値が2、3倍大きくなることから、Newtonは屈折力の根源を硫黄質に求めている。なお、硫黄質とは現在で言う可燃性物質ということで硫黄を含むという意味では必ずしもないことには注意。Newtonは

天日取りレンズで集められた光は最も強く硫黄質の物質に作用して、それを火や炎に変えるが、すべての作用は相互的であるから、硫黄は最も強く光に作用するはずである。

と議論の整合性を主張している。そして、第Ⅱ編第Ⅱ部の前半の命題は、次のように締めくくられる。

私はこれまで物質の反射および屈折する力を説明し、また透明薄板、繊維および粒子が、それぞれの厚さと密度に応じて、それぞれの種類の射線を反射し、それによってそれぞれの色に見えること、したがって、天然物のあらゆる色を生じるためには、それらの透明な粒子のそれぞれの大きさと密度以外には何も必要でないことを示した。

2.2.3 第Ⅱ篇 第Ⅲ部 (後半)

第Ⅱ篇第Ⅲ部の後半の前には

これまで述べた命題は物質の本性に関するものであり、これから述べるのは光の本性に関するものである。

とある。ここでNewtonは、“なぜ薄板、繊維および粒子が、それぞれの厚さと密度に応じて、それぞれの射線を反射するか”という問いに答えようとしているが、現代の目で見れば構造色の成因は、波動の干渉効果である。Newtonは『光学』において必ずしも粒子説、波動説に対する一貫した態度を示していない。事実、命題Ⅺの本文中においては

これはいかなる種類の作用ないし性向なのか、それは射線、または媒質、または他の何かの循環運動ないし振動なのか。私はここではこれらのことは問わないことにする。

と述べ、ただ反射される性向を「反射の発作」、透過される性向を「透過の発作」と呼ぶことで本質論を避けた。例えば「ある透明物質の表面が、入射光の一部を反射し、その他を屈折するのは、ある射線は反射の発作にあり、他の射線は透過の発作にあるからである」と述べているが、これが何の説明にもなっていないことは明らかであろう。したがって、ここでは第Ⅲ部の後半についてこれ以上立ち入ることはやめておく。

2.2.4 第Ⅱ篇 第Ⅳ部

第Ⅱ篇第Ⅳ部では「厚い透明な磨かれた板の反射および色についての観測」と題して、鏡と光軸上に置かれた中心に小さな孔のあいた厚紙を置き、厚紙上に観測される色環についてNewton環との対比を行なっている。現代の目で見れば本質的に同じ現象ということもあり、これもまたその詳細に立ち入ることは不要であろう。

2.3 第Ⅲ篇

第Ⅲ篇は第Ⅰ部のみからなり、扱われているのはF. M. Grimaldi (1618-1663) によって見出された光の回折である。太陽光の回折ではやはり有色の帯が見えることから、Newtonも興味を持って実験を行い、以下の観測1~11として報告している。

(1) ピンであけた小孔を通った太陽の光束中において毛髪の影は、光がそのそばを通ったときより

幅広くなる。

- (2) この光の中のすべての物体の影は、三つの色縞でふちどられる。
- (3) 影と縞の幅の測定。
- (4) 毛髪から影と縞を投じる物体までの距離と、縞との関係。
- (5) 鋭いナイフの刃の影。影の中のかすかな光の流れ。
- (6) 二枚の向かい合った刃の間に光を通したとき、刃と刃の距離と影の幅の関係。
- (7) 三つの縞を生じる各光が刃を通過するときの刃からの距離。
- (8) 二本のナイフの刃が $1^{\circ}54'$ の角をなすとき、太陽の光束によって生じる縞。
- (9) 上記の観測で、紙面に縞を作る光は、ナイフから紙への距離に応じて異なる。
- (10) ナイフから大きな距離では、縞は双曲線形となる。
- (11) 太陽スペクトルの各色中での物体の影は、各色の縞でふちどられる。1および2の回折縞の説明。

これらの実験、とくに鋭いナイフの刃の影による回折実験を通じて、“光の射線が物体のそばを通過するとき、どのように曲げられて、色の縞とそれらの間の暗線を生じるかを明らかにする”ことを目的としていたが、それは未完であると述べている。

2.4 Query

以上見てきたようにNewtonの『光学』の主題は色である。光の色については、第Ⅰ篇において実験に基づく十分な論証がなされたのに対して、第Ⅱ、Ⅲ篇における「物質のもつ固有の色の成因」および「光と物質の相互作用」を明らかにしようとする彼の計画は、不首尾に終わったと言ってよいであろう。このことはNewton自身も認めており、それがゆえに彼は、自らのプログラムに沿って今後検討されるべき以下の31項目のことがらを『光学』の最後にQuery (疑問) の形で記したのである。

- Q1. 物質はある距離において光に作用し、最も近いとき最も強く、その射線を曲げる。
- Q2. 屈折性の異なる射線は、回折性も異なる。
- Q3. 物体のそばを通過するとき、光の射線はうなぎのような運動をする。
- Q4. 光の射線は、物体の表面に到達しないうちに反射または屈折される。
- Q5. 物質と光は相互に作用し合う。
- Q6. 黒い物質が容易に光から熱を受け入れる理由。
- Q7. 光と硫黄質物質との作用の激しき。
- Q8. 不揮発性物質の発火現象。
- Q9. 火は、光を大量に放射するほど熱せられた物質である。
- Q10. 炎と煙霧。火薬の爆発。
- Q11. 太陽など巨大な物体における熱の保存。

- Q12. 視覚の生理学。
 Q13. 射線の種類と、振動の大きさと、色の種類の対応。
 Q14. 色の調和と不調和の、振動の比との関係。
 Q15. 二つの視神経は、脳に入る前に交わる。
 Q16. 眼を圧して生じる色。
 Q17. 光による媒質の振動が伝播するとき、後の振動が前の振動に追いついて、反射の発作と透過の発作を生じる。
 Q18. 二本の温度計の実験。すべての物質に浸透する微細な媒質。
 Q19. 光の屈折は、エーテル媒質の密度の差異によって生じる。
 Q20. 光はエーテル媒質中で漸次曲線状に曲がる。
 Q21. 大きい物体相互の引力は、エーテル密度の差によって生じる。エーテル粒子の微小さと弾力性。
 Q22. 惑星や彗星に対するエーテル媒質の抵抗は、無視できるほど小さい。
 Q23. 視覚、聴覚その他の感覚は、この媒質の振動によって生じる。
 Q24. 動物の運動は、エーテル媒質の振動によっておこなわれる。
 Q25. 氷州石の複屈折。
 Q26. 複屈折は、光が性質の異なる諸側面をもつことによる。
 Q27. 光学現象を射線の変改によって説明する仮説は誤りである。
 Q28. 光は流体媒質中を伝播される圧力であるという説は誤りである。
 Q29. 光の粒子論による屈折、反射、色、反射の発作、透過の発作および複屈折の説明。
 Q30. 物質と光は相互に転換できる。
 Q31. 光の射線と物質粒子の間、また物質粒子相互の間に作用するさまざまな力。

これらは初版出版時にすべてが揃っていたわけではない。1704年の英語初版にはQuery 1-16のみが掲載された。その後1706年のラテン語版でQuery 25-31が加わり、残るQuery 17-24はそれからおよそ10年経った1717年の英語第2版で追加された^[2]。この順番に別々に、少し中身を見てみよう。

2.4.1 Query 1-16

Query 1-4は物質が光にどのように作用するかを検討したもので、Query 5で初めて光の物質への作用が論じられる。ここでの

物質と光は相互に作用し合うのではないか。すなわち、物質は光を放出し、反射し、屈折し、回折してそれに作用し、また光は物質に作用して、これを加熱し、その粒子に熱の本質である振動運動をさせるのではないか。

との見解は、かなり正しい認識と言ってよいであろう。ここでNewtonは、R. Boyle (1627-1691) やR.

Hooke (1635-1703) と同様、熱の運動説をとっている。歴史的にはその後熱素説が興隆するが、最終的にそれが原子分子の運動に帰着させられることはよく知られているところである。Query 5を踏まえて、Query 8では“すべての不揮発性物質は、ある程度以上に加熱されると、光を放出して輝くのではないか”、Query 9では“火は、光を大量に発するほど熱せられた物質ではないだろうか”、また、Query 11では“大きい物体は、その中の粒子が互いに熱し合うので、その熱を最も長く保存するのではないか、大きく密な不揮発性物質は、ある程度以上に熱せられると、おびただしく光を放出し、その光の放出と反作用、およびその細孔の中での射線の反射と屈折によってさらに熱くなって、ついには太陽の熱のような、ある最終段階の熱に達するのではないか。太陽や恒星は、猛烈に熱い巨大な地球であって、それらの熱はそれら本体の大きいことと、それら相互の作用と反作用と、それらの放出する光とによって保存されているのではないか”と後の黒体輻射を彷彿とさせる記述が見られる。もちろん、光の放出は“それらの物質の粒子の振動によっておこなわれるのではないか”とされており、全てが正しい訳ではない。Query 12、15、16では視覚の生理学的側面についての考察がなされている。

2.4.2 Query 25-31

Query 25、26は複屈折、27-29は光の粒子説、30では自然界での様々な転生を例に取り、光と物質が相互に作用し合うのならば、それらは互いに転換可能であるとする。31は本稿第1節で触れた、同時代の人々に最も影響力のあった疑問である。こちらについては第2.4.4節で改めて論ずることにしよう。

2.4.3 Query 17-24

Query 17-24は英語初版刊行から13年、ラテン語版刊行から9年たったの追加であるが、Query 17をはじめとして、やや波動論に寄った議論が散見され、粒子論の限界を感じての改訂だったのではないかと想像される。

2.4.4 Query 31

Queryのうちで最も長く最後にあるのが31である。本稿の第1節でも引用した冒頭の

物質の微小粒子にはある能力、効能、もしくは力があり、それによって、ある距離を隔てて光の射線に作用して、それを反射、屈折、回折させるばかりでなく、物質粒子同士も互いに相互作用し合って、自然現象の大部分を生じるのではないか。

という物質観は『光学』の本論でNewtonがたどり着いた物質が光に及ぼす力、微粒子に基づく物質の構造論を拡張したものであると同時に、『プリンキピア』でNewton自身が確立した世界観との調和を図ったものと言えるであろう。また、

要をいち早くフランスのアカデミーに報告したE. F. Geoffroy (1672-1731) は、この記述に多大な影響を受け、物質間の化学親和力 (affinity) をまとめた“Tables Des Rappports”を作成した。Geoffroy自身は錬金術の手垢の着いた化学親和力という言葉を用いなかったが、彼につづく多くの人々はNewtonの“物質粒子間の力”を“化学親和力”と呼んで、広範な物質間の相互作用の序列を決定していった。

この“化学親和力”と言う言葉は広く人口に膾炙し、文豪J. W. von Goethe (1749-1832) は1809年にその名も『親和力』(Die Wahlverwandtschaften) と題した小説を書いたし、M. Faraday (1791-1867) は1859年のクリスマスレクチャーにおいて一般市民向けに『力と物質』と題した連続講義をするに当たり、その一日を化学親和力の解説にあてている。

なお、現代の化学者も酸塩基反応については酸解離定数 K_a (通常は pK_a)、酸化還元反応については標準電極電位 E° によって定量化した形で同様の表を作成し、多種多様な反応を整理している。ただし、これらは標準反応ギブズエネルギーと関係する量であり、いわゆ

る“力”ではないことに注意が必要である。力学であれば、エネルギーを原子間の距離で微分することにより力と関係づけることができるが、この場合に拠り所となるのは熱力学であり、熱力学体系にそのようなミクロな変数を導入することはできない。化学親和力は最終的に20世紀初頭にT. E. de Donder (1872-1957) によって反応ギブズエネルギーを反応進行度 ξ で微分した量として定義される。このとき、奇しくも分光学を発端としたミクロの世界の“力学”——量子力学の建設が進行しており、Newtonの『光学』が発端となった物質の探求はおおよそ200年の時を経て、ほぼ同時期に一応の完成を迎えることとなる。

3 『光学』の成立過程とQuery 31

本節では、Newtonの年譜(表1)に基づいて『光学』の成立過程を見てみたい。1661年にTrinity College (Cambridge) に入学したNewtonは、1664年から1666年にかけて「哲学的疑問」(Quaestiones quaedam philosophiae) を執筆する。内容は多岐に渡

表1 Newtonの年譜

西暦	できごと
1642	WoolsthorpeにてI. Newton生まれる (12/25)。 Newtonの両親が結婚 (4月)、父が死去 (10月)。Galileo Galilei没。清教徒革命始まる。
1665	GranthamのGrammer School入学 (下宿は薬剤師Clarkeの家)。
1660	王政復古。王立協会創立 (11月)。
1661	Trinity College (Cambridge) 入学 (18歳)。
1664	「哲学的疑問 (Quaestiones quaedam philosophiae, Add. MS. 3996)」執筆 (~1666)。 R. Boyle「色についての実験と考察」、R. Descartes「屈折光学」ラテン語版刊行。
1665	卒業。非球面レンズの試作。ベストの流行によりWoolsthorpeに戻る (6月)。 R. Hooke「顕微鏡観察誌」、R. Boyle「冷の実験誌」 F. M. Grimaldi「光、色および虹についての自然学・数学」
1666	奇跡の年 (Anni Mirabiles)。太陽の白色光の複合性を示す決定実験。 微積分、万有引力の発見もこの年であるとされる
1669	反射望遠鏡を製作 (3月)。第2代Lucas教授に就任 (10月、26歳)。
1670	最初のLucas講義として光学を講じる。
ca.1670	化学実験の経験を踏まえて、化学用語辞典を作成 (Index Chemicusとは別のもの)。
1672	王立協会会員となる (1月)。「光と色についての新理論」を発表 (2月)。
1675	「光の諸性質を説明する仮説」、「天然物の色と透明性に関する観測」を発表 (12月)。 R. Boyleと会う。
1678	日付入りの実験ノート (Add. MS 3973) の開始 (~1696年2月)。
ca.1680	錬金術文献に関する「化学索引 (Index Chemicus)」の作成に着手 (~ca.1690)。
1682	プリンピキア初版のための「結論 (Conclusio)」を執筆 (未出版)。
1687	『プリンピキア』刊行。
1688	名誉革命
1690	「光学の基礎」37葉を執筆。 C. Huygens「光の論考」
1692	「酸の本性について」執筆 (1710年出版)。
1693	神経衰弱に陥る (9月)。
1696	造幣局監事就任、London移住 (4月)。
1699	造幣局長官就任 (12月)。
1701	Lucas教授職とTrinity Collegeのフェロー職を辞任。
1703	王立協会会長となる (11月)。
1704	『光学』英語初版出版 (疑問1-16)
1706	『光学』ラテン語訳初版出版 (疑問1-23)
1717	『光学』(疑問24-31付加) 疑問31 粒子と粒子間力による物質理論の記述
1727	ロンドンにて死去 (3/20)。
1730	『光学』英語第4版出版。

るが、すでにプリズムを用いた実験の記録がある。1664年にはBoyleの「色についての実験と考察」、Descartesの「屈折光学」ラテン語版が刊行されていることと関係があると考えられる。Boyleの著作では、色の原因、石鹼の泡の色に加えて、いわゆるpH指示薬としての植物色素も扱われており、光と物質の色に物質構造論をも含むNewtonの光学研究は、Boyleが議論した対象に、プリズムによる屈折という手段を適用するという形でその射程が定められたと言えそうである。Newtonがこの時期、錬金術を自然哲学として実践しようとしていたBoyleの影響を受けて化学実験をするようになった背景には、Grantham時代の下宿先が薬剤師Clarkeの家だったことの影響も大きかったと考えられる。

1665年にTrinity Collegeを卒業後、Newtonはペストの流行のために故郷のWoolsthorpeに戻るが、ここで太陽の白色光の複合性を示す決定実験を行なったと考えられている。一連の実験により屈折望遠鏡の色収差の存在を明確に理解したNewtonは反射望遠鏡を作成する。1669年には26歳で第2代Lucas教授に就任するが、その翌年、最初のLucas講義としてNewtonが選んだ題材は光学であった。この頃にNewtonは多くの実験道具を購入し本格的な化学実験を始め、自分のための化学用語辞典を作成したことが知られている。

1672年には反射望遠鏡の製作が認められ、王立協会会員となり、2月には「光と色についての新理論」を発表、これがほぼ『光学』の第I篇となる。1675年には「天然物の色と透明性に関する観測」を発表、これは『光学』の第II篇の第I、II、III部とほぼ重なる。つまり『光学』の本論の骨格部分はこの時点ですでに仕上がっていた。

一方、Query 31にある“物質粒子間の力”は当初『プリンキピア』初版のための「結論 (Conclusio)」として1682年に書かれたものだということがR. S. Westfallによって明らかにされている^[3]。最終的なQuery 31がいつ仕上がったかは定かでないが、少なくとも1678年から1696年の18年間に渡って日付入りの実験ノートをつけながら錬金術実験に情熱を傾けた時期と重なっていることは間違いがない。

本稿第2.2.2節で見たように、Newtonは『光学』で主題とした色のうち、第II篇では物質固有の色の問題を取り上げていたが、光の色についての第I篇と比較すると議論の明晰さは明らかに劣るものであった。Newtonも当然そのことを認識していたであろう。この『光学』の骨格部分の完成と、化学実験が本格的に開始された時期がほぼ同時期であるということには意味があると思われる。つまり、一見『光学』と関係が薄いように思われる化学実験に、Newtonは大きな関連を見ていたということである。物質固有の色の議論においては必ずから物質の構造が問題となり、第2.2.2節で見た第II篇第II部の構造論を前提とすれば、物質粒子間の力へと議論が進むのも当然のことと言えよう。そして、化学反応を通じてその本質に迫ることを

Newtonは目指したのである。このように考えると、『光学』におけるQuery 31の存在は、なんら不思議なことなどなく、まさにそれを締めくくるのにふさわしいものであったと言いうことができよう。

4 Newtonは最後の魔術師だったのか

日付入りの実験ノートをつけながらの1678年から1696年の“化学実験”は化学というより錬金術のそれであったという指摘がある。1680年あたりから10年間にわたって錬金術の文献の渉猟、文献の記載に基づく実験、結果の整理を行い「化学索引 (Index Chemicus)」を作成したことから、錬金術を自然哲学として実践することを「懐疑的化学者」で宣言したBoyleに影響を受けた当初と異なり、Newtonは神秘主義に囚われていったのだということである。Newtonの錬金術手稿は、Newtonの死後、近親者によって秘匿された。かの偉大なるNewtonがオカルティズムに毒されていたなどあってはならないこととされたのである。Newtonの錬金術手稿が1936年にオークションにかけられたとき、それを落札した経済学者のJ. M. Keynes (1883-1946) は、Trinity Collegeで開催されたNewton生誕300年祭に寄せた一文において、次のように述べている。

Newton was not the first of the age of reason.
He was the last of the magicians, the last of the
Babylonians and Sumerians, ...

つまり、Newtonは理性の時代の最初の人ではなく、最後の魔術師だという訳である。果たしてそうだろうか。前節で議論したように、『光学』第II篇の物質固有の色の議論に満足しなかったNewtonは、物質粒子間にはたらく力の探求をするにあたり、錬金術にも何がしかの真実があると見て、自ら実験を行いながら各種文献を批判的に検討し、「化学索引 (Index Chemicus)」を作成したと考えるべきではないだろうか。錬金術はこの時代、確かにオカルティズムに堕してはいたが、その起源のひとつはエジプトの高度な文明を支えた化学技術であったし、現代でもいくつもの錬金術実験が化学教育の題材として取り上げられる^[4] など、少なからず正しい化学的知識を含むものであった。冒頭でも述べたとおりNewtonは優れた実験科学者であった。彼は徹底した実験によって、混乱を極める錬金術文献の記載から客観的な科学的知識を得ることができるとの自負があったのであり、その実践のための自分自身のためのメモとして「化学索引 (Index Chemicus)」は作られたと見るべきであろう。錬金術の文献を読み、まとめ、実験を行った事実をもって錬金術師であるとするのは短絡的に過ぎると思われる。『光学』におけるNewtonの議論の進め方、丁寧な実験、そしてQueryに示された論考を見れば、やはりそれは理性の時代の人としてなされたものであったと考えるのが

自然である。何をその人がなしたかだけでなく、何を目的としてそれをなしたかで判断するべきであろう。Query 31を読むと、確かにアナロジーを進める上での比喩が、ある種の神秘主義に見える箇所が皆無ではないかもしれない。しかしながら、その最後で分析と総合によって自然哲学を進めることの意義を説き、“探究心の旺盛な人々のその後の実験と観測に期待する”として結んだNewtonは、若かりし頃、錬金術を自然哲学として実践すべきとしたBoyleへ感じたシンパシーを終生持ち続けたのだと言えるのではないだろうか。

5 おわりに

『分子分光学（'15）』、『化学反応論—分子の変化と機能（'17）』の作成にあたり、初学者のための導入部として、それぞれの学問分野の成立の歴史的経緯に触れた。この過程において、分子の構造論と反応論の両面において——つまり化学の発展において『光学』が果たした歴史的役割が意外にも大きいことを知った。

一方で、Newtonは錬金術に手を染めた一面があったことも広く知られている。もとより一人の人間が多面性を持つことに何ら不思議はないが、『光学』の通読とNewtonの錬金術研究の調査から、どのようなNewton像が見えてくるのかを検討したのが本稿である。

参考文献

- [1] ニュートン著、島尾永康訳『光学』、岩波書店（1983）。底本は英語第3版。
- [2] 大野誠、“ニュートンの『光学』と錬金術：覚書”、愛知県立大学外国語学部紀要第46号、pp.25-46。
- [3] M.L.R.ボネリ、W. R.シエイ編；村上陽一郎〔ほか〕訳『科学革命における理性と神秘主義』、新曜社（1985）。
- [4] A. T. Schwartz, G. B. Kauffman, “Experiments in Alchemy”, *J. Chem. Educ.* **53** (1976) pp.136-138 (Part I), pp.235-239 (Part II)。

(2016年11月14日受理)