

科学的概念の形成と理解

— その科学史的事例, とくにハットンによる赤外線発見の場合 —

渡 辺 正 雄

目 次

1. はじめに
2. 科学的概念の形成とその事例
3. ハットンによる赤外線発見の場合

科学的概念の形成と理解

— その科学史的事例，とくにハットンによる赤外線発見の場合 —

渡 辺 正 雄*

1. はじめに

科学教育においては、さまざまな科学的概念が提示されてその理解が求められる。その場合、それらの科学的概念は、ふつう、最も整序された形で履修者の前に示されるのであり、ある意味では、教育上それが最も近道なのである。しかし、近道であるということは、必ずしも最も理解しやすい道であるということではない。近道であるがゆえに、あまりにも唐突に新しい概念が出現してかえって捉えようがなかったり、さまざまな角度からこの概念に接近していつて表からも裏からも眺めるといった贅沢も許されないのである。場合によってはむしろ、ある科学的概念が形成された経緯なり過程なりに着目することによって理解の幅と深さを増大させるというのが、教育的により効果的なのではあるまいか。これによって、この新しい概念を理解するうえでのさまざまな手がかりが得られるであろうし、また、そのような概念を立てることがなぜ有意義なのかということも分るであろう。さらに、それを通して、こうした知的形成に参加した人々の研究活動やその思想的・社会的背景との関係にまでも理解が及ぶならば、一般履修者の多くは、科学という科目が歴史や文学や美術や音楽等々の諸科目と決して無縁なものではないことを知るであろうし、科学者と呼ばれる人々も決して自分たちと別種の人々ではないということを確認するにいたるであろう。こうして、科学への嫌悪は興味に変わり、科学者に対しておぼえられがちな劣等感や疎外感は親近感に変わることであろう。科学という科目はもはや、一般履修者にとっての知的拷問ではなくなるのである。

このような次第で、一見遠まわりのような上述のアプローチが、実は、科学教育の目的によくかなった道となりうるのである。もちろん、すべての科学的概念についてこのようなアプローチをとることが必要だというわけではない。いくらかのものについてこれを行えば、科学への理解は質的にひじょうな向上を示すものと思われる。この方法を実施するためには、科学史上の知識、それも正確な知識を参照することが必要である。科目としての「科学史」が教育上重要な意義をもつこと¹⁾に加えて、学問としての「科学史」が科学教育に少なから

* 大学教育研究センター客員研究員／東京大学教養学部教授

ぬ寄与をなしうる所以である。

そこで本稿においては、まず、科学的概念の形成について科学史の観点から一般的な事項を簡単に述べたのち、科学的概念形成の事例を二、三紹介し、最後に、科学史研究における筆者の最近の成果である、ハットンによる赤外線発見の場合について、やや詳しく述べてみることにする。科学的概念の形成に関する科学史的知見は、科学教育にいかなることを示唆するか、また、科学教育の具体的な場面においていかに利用されうるか。そのような問題を考察し、また実地に試みるための材料として本稿が役立つならば幸いである。

2. 科学的概念の形成とその事例

“科学的概念”と言っても、それは、必ずしも科学的研究の結果として生まれ出てくるものであるとはかぎらない。多くの場合にはむしろ、何らかの既存の概念が、とりあえず現象の理解や説明のためのアナロジーとか概念枠として用いられ、それが、研究の進展に伴って次第に科学的なものに純化されて明確な意味をもつようになり、あるいは、不適切なものとして廃棄されたりする、というのが実状であろう。もとより、問題により、科学の発展の度合いに応じて、その様態は種々さまざまである。また、そこに登場する諸概念としては、アナロジーとか概念枠という言葉で呼ぶにはあまりにも基本的であまりにも広汎なもの、すなわち、その概念を俟ってはじめて自然科学の成立が可能となったような世界観的な概念とか自然観のようなものから、もっと小規模なもの、特定の事象に限って適用されるものにといたるまで、各種各様のものがある。

前者の例としては、この世界は被造物である、この世界には秩序がある、自然は斉一的である、自然は数学的構造をもつ、といったものがあり、また、次第に廃棄されてはいったが、アニミズム的自然観、擬人的自然観、生氣論的自然観、といったものを挙げることもできよう。

前者と後者の中間程度のものには、自然は真空を嫌う、自然は無駄なことをしない、自然は飛躍しない、自然は atomistic な構造をもつ、自然は整数比の構造をもつ、自然は機械のようにできている、自然界の諸変化の中に保存される量がある、などのような、自然の本性にかかわる歴史的で基本的な諸概念があると言えよう。そして、これらの概念の多くは、今日なお、時には意識されずに、また時にはやや形を変えて、用いられているものである。

もっと小規模の、特定の事象に限って用いられる概念となると、実に多種多様のものがある。その中には、アナロジーないし概念枠として出発したものもあれば、ある程度はアナロジーないし概念枠がかかわりながらも、研究の進展につれて整備され確立されて明確な科学的概念になったという種類のものもある。本節では、科学的概念の理解に示唆するところが少なくないと思われるものの例を2種類(3事例)取りあげて紹介してみよう。

(a) 万有引力の概念

今日の科学書では、磁気力と重力ないし万有引力とは最初から別のものとして取り扱われている。しかし、万有引力概念の最初の形成は、拡張された磁気力の概念枠の中で行なわれたのである。もちろん、西洋世界での事である。

コペルニクスの太陽中心説が現れるまでは、この世界は、天上界と地上界とに截然と分けられていた。自然現象にかかわる科学法則も、天上界と地上界とでは別々であった。ところが、太陽中心説によって地球もひとつの惑星（天体）であるということになると、こうした区別は撤廃されなければならなかった。天上界も地上界も、同一の原理、同一の法則によって理解されるべきであった。運動に関してこの統合を見事に樹立したのがニュートンであった。彼はその運動法則と万有引力の法則とによって、りんごの落下と月の“落下”，地上の物体の運動と天体（惑星）の運動とを統合的に説明することに成功した。そして、この万有引力の概念の形成に必要な不可欠な役割を果たしたのが、拡張された磁気力の概念だったのである。

羅針盤はもともと中国の発明であるが、西洋でこれが遠洋航海に利用されるようになると、その需要も急増し、磁石に関する研究も盛んになった。中でも、『磁石について』（1600年）を著わしたウィリアム・ギルバートは、航海者たちが経験的に見出した磁針の伏角現象と、自らの球形磁石に関する実験とから、地球はひとつの大きな磁石であるとの結論を導いた。彼はさらに、月や太陽や惑星も磁石であると考え、いずれも、相互の磁気作用によって自転と公転を行なっているものと解釈した。月が地球に対してつねに同じ面を向けているのは地球の磁気作用によるのであり、地軸がつねに北極星に向かっているのも磁気の指向性による、と彼は考えた。

これらの考えは、そのまますべて正しいものではなかったわけであるが、実は、このような考え方が現れたことによって始めて、地球上の重い物体はその本来の場所である宇宙の中心すなわち地球の中心に戻ろうとするのであるというアリストテレスの理論を棄てて、物体（磁石）はその質量の大小に応じた大小の力で相互に（“宇宙の中心”という特定の点に向かってではなく）引き合うという新しい考え方が可能になったのであり、さらに、天体間にもそれと同種類の力が働いているという考えが生まれえたのである。ケプラーはこの考えに則って彼の天文学、天体力学を展開することができた。そして、物体間にも天体間にも同じ磁気力が作用するというこの考えの延長線上に、万有引力の概念が着想されえたのである。そうであればこそ、ニュートンがその『プリンキピア』の中で万有引力について述べたさい、今日の科学書とは違って、これは磁気力とは異なるとわざわざ断わっているのである。磁気力概念の延長線上で生まれたものであったからこそ、そのように断わる必要があったのである。

(b) 太陽の光とろうそくの光；電池の電流と発電機の電流

前項の例は、万有引力という新しい概念と、その形成を手引きした磁気力の概念とが、結

果的には別であったという場合であるが、次に紹介するのは、それとは反対に、最初は別々と考えられていたものが、結果的に同じと判明したという二つの例である。

今日、光の反射とか屈折などについて書いたり教えたりする場合、その光源が何であるかということは、ふつうには問題にしていない。しかし、ニュートンが太陽の光線をプリズムで分けて光と色の諸性質を明らかにしたとき、ろうそくの光や“台所の火の光”についても同じことが言えるかどうか、彼は真剣に問題にしたのである。これは、ひとつには、前項でも見たように、つい先頃まで、この世界が天上界と地上界の二領域に分けて考えられていたからである。そうだとすればなおさら、太陽光線という天上界からの光と、ろうそくの光や“台所の火の光”のような地上界の光とが同質であるという必然性は全くないのであって、両方についてそれぞれプリズムによる実験を試みることは絶対に必要だったのである。実験によって始めて、ニュートンは、両方の光とも分解や色に関する性質が等しいと結論することができた。

これらの成果はニュートンの『光学』として発表されたが、彼の『プリンキピア』でも、その「第3書」の冒頭に掲げた「哲学するための諸規則」のⅡ，“したがって、同じ自然結果に対しては、できるかぎり、同じ原因を当てなければならない”に続く説明文として、

例えば、人間における呼吸と獣類における呼吸、ヨーロッパにおける石の落下とアメリカにおける石の落下、われわれの台所の火の光と太陽の光、地球における光の反射と惑星における光の反射。

と記されているのである。“哲学”（今日の言葉では“科学”）が、さまざまな差異を貫く一般的関係を求め、異なる諸現象を包括する科学的概念の樹立を旨とするものであればこそ、このような「規則」に立脚することが必要だったのであり、天上界と地上界の統合をやりとげたニュートンであったからこそ、そのことをとくに強く自覚していたのである。次の例に移ろう。電気学が急速な進歩を示すようになったのは、電池の発明によって始めて安定した連続的な電流が得られるようになった19世紀初頭以降のことである。これによって、電流と磁気の関係も明らかにされ、磁気力の変化から電流を生じさせること、すなわち発電機の製作も可能になったわけであるが、電池から得た電流の発熱作用を研究していわゆる“ジュールの法則”を見出したJ.P.ジュールは、発電機から得た電流についても同じことが成り立つかどうか、実験して調べてみたのである。

彼がそれを問題にしたのは十分に理由のあることであった。電流発生の方法が異なるということだけでもこのような疑問は当然発せられなければならないものであるが、それに加えて、とくに次の事項がジュールの頭にあったのである。すなわち、電池ではその中の亜鉛が消費されて電流が生じ、この電流が通過して針金が熱せられるのであるから、もしかしたら、空气中で亜鉛が燃烧して生じる熱も同じく電流による発熱、つまり、亜鉛原子と酸素原子とが結合するときに生じる放電による発熱なのではあるまいか。そして、一般に化学反応熱はこうした電氣的起源によるものなのではあるまいか。もしそうであるとしたら、なおさら、

亜鉛の消費によって得られる電池からの電流と、化学的ではない作用によって得られる発電機からの電流とでは、その発熱作用に相違があると考えるのが当然である。実験の結果を俟ってはじめて、このような相違がないことをジュールは見出した。これは、ジュールにとって、むしろ意外な、何とも不思議な結果とさえ思えたことであろう。それを、今日のわれわれは、最初から自明のことのように、改めて考えてみることも驚くこともなしに取り扱っているのである。

以上はいずれも、科学史上既知の事例の中から取り出して概述したものである²⁾。次には、筆者自身の科学史研究における最近の1成果³⁾を、一次資料をも引用しながら紹介してみよう。これは、科学的概念の形成におけるいっそう生まの姿を伝える1事例であり、いまだ概念が固まるにいたらぬ過渡的な状況を示す1事例である。

3. ハットンによる赤外線発見の場合

ジェイムズ・ハットン (James Hutton, 1726–97) は、何よりも近代地質学の創始者として知られている。一方、赤外線の発見と言えば、それは天文学者ウィリアム・ハーシェル (William Herschel, 1738–1822) によってなされたというのが従来の通説である。ところが、ハットンが光と熱と火について論じた1794年発行の著書 *A Dissertation upon the Philosophy of Light, Heat, and Fire*⁴⁾ には、彼が実験的に見出した“obscure light”の記述があり、これは、大きな加熱力をもった不可視光のことであって、赤外線そのものに他ならないのである。このハットンの著書は、ハーシェルがその“invisible rays”すなわち赤外線のことを書いた一連の論文⁵⁾よりも6年早く出版されているのである。したがって、赤外線の最初の発見は、ハーシェルではなくて、むしろハットンに帰せられるべきであろう。

もっとも、ハットン自身は、自らの発見の意義を十分に自覚してはいなかったようである。*Dissertation*の中心問題は、一種の燃素説(phlogiston theory)に立つハットン自身の光・熱・火の理論を弁じて、そのころ現れた熱素説(caloric theory)を論破することであった。当時、ハットンは、熱が地質学的動因の主要なものであるとする彼の説に対して烈しい批判を受けていたのであるが⁶⁾、この *Dissertation* は、光と熱と火を主題とする著作であったにもかかわらず、人々の注意をほとんど惹かなかったようである。ジョン・プレイフェアによるハットンの有名な詳しい伝記においてさえ、*Dissertation*のことは、書名すら掲げずにわずか数行で片づけているほどである⁷⁾。加えて、光・熱・火に関するハットンの理論は、燃素と“太陽物質”(solar substance)とを前提する奇異なものであった。そのうえ、彼の文章がまわりくどくて晦渋であることは、当時からすでに定評のあるところであった⁸⁾。“obscure light”としてのハットンの赤外線発見が研究者からも注目されぬまま今日にいたったのは、このような諸事情によるのではあるまいか⁹⁾。

ハットン自身の記述によると¹⁰⁾、彼は以前に光の性質とくに赤い光(“the red species of light”)に関する観察について論文を書いたことがあり、これを、1792年に出版された彼の著書¹¹⁾の中に包含して発表するつもりであったが、著書の分量が大きくなりすぎたため断念せざるをえなかった¹²⁾ところが、ピクテールが行なった実験のことを知ってから(おそらくピクテールの著書 *Essai sur le Feu*¹³⁾の英訳本¹⁴⁾によって)、かつての自分の観察はこれと深い関わりがあり、自分の理論にとって重要なものであると考えるようになった。後述するように、ピクテールはその実験結果を説明して、反射性をもった熱の放射が起こっていると考えたのであるが、ハットンはこれを容認することができなかった。というのも、ハットンの考えによれば、熱い物体から出ているのは、放射熱なのではなくて、不可視の光でなければならなかったからである。

Dissertation によれば、未発表に終わったハットンの論文は、彼が実験によって見出した次のような事柄を記したものであった。

複合光すなわち白色光は、加熱力 (power of exciting heat) に比して、より大きな可視力 (power of giving vision) をもっている。ところが、赤い光はその反対である。つまり、その可視力に比して加熱力が大きいのである¹⁵⁾。

ハットンはさらに続けて、光に関しては一方に“各種の色の光の各種の屈折性”という現象があり、他方に“各種の加熱力”という現象があるとし¹⁶⁾、前者はプリズムによる色のスペクトルによって明らかであるが、後者は、2種類の色の光の加熱力を比較したハットンの実験によって明らかにされたと記している¹⁷⁾。この実験については、より適切な装置を使っていっそう正確に行なうことが必要とハットンは考えていたが、まだそれを行なうにはいたっていなかった¹⁸⁾。彼の以前の実験は、“異なる種類の光を等しい度合いで比較する”もので、それは次のように行なわれた。

……異なる種類の光の強さを等しい度合いにするために用いた方法は、光源を遠ざけて、その光のもとでやっと読める程度にまでその強さを下げるといったものであった。こうして、2種類の光を等しい強さで比較することができた。すなわち、炭の火の赤い光と焰の白い光とである。次いで、これらの光の、可視力に対する加熱力の大きさを判定することができた。このようにして、一方の種類は他方よりもずっと加熱力が強いことを見出したのである¹⁹⁾。

これと関連のあるもうひとつの現象についてハットンは次に記している。

極度の白熱状態にある物体が出す光は、ほとんどすべて白色光すなわち複合光である。しかし、熱の強さが減少していくにつれて、光は次第に赤の種類のものになる。したがって、われわれの原理によれば、物体は、強く熱せられるほど、感覚〔視覚〕により多く作用し、物体をより少なく熱する光を放射する。ところが、白熱の熱が減少すればするほど、視覚には少ししか作用しないで物体を多く熱する光が放出されるのである²⁰⁾。

ハットンはここから、次のような重要な推論を導いた。すなわち、白熱の度合いが最小に

なって、“放射光がわれわれの感覚に作用しなくなってからも、”

なお光が放射しているのである、われわれの視覚器官はその作用を感じえないにもかかわらず。²¹⁾

彼はここで、人間の視覚が光を感じなくなる限界点はきわめて不明確であることに言及している。人間の眼は、光が全くないのかどうかを判別することができないからである。

日中の光になれた眼には、ある場所は全く暗く見えるが、長いこと暗いところにいた眼には、その場所にある物体が完全に見えるのである。²²⁾

こうしてハットンは、次のように主張することができた。

それゆえ、ここに、*obscure* と名づけられる種類の光があるのである。²³⁾

さらに推論を進めて、彼はこのように記している。

この *obscure light* の加熱力は、これまでのようにさらに減少を続ける。²⁴⁾

ハットンはこの“*obscure light*”を、次のような、さまざまな光の“段階”(gradation)との関係で捉えている。

光の感覚を与えるのには最もあるいは相当に適しているが、物体を熱するにはそれほど適していないものから、それとは反対に、物体を熱する大きな力をもっているが、われわれの視覚を刺激するにはほとんど適していないものにいたるまでの段階。²⁵⁾

彼はしかも、次のように述べて、スペクトルの赤外部のみならず、紫外部にも光と加熱力がある可能性を示唆している。

われわれの感覚に固有な範囲の上にも下にも、不明確な度合いの熱ならびに光があるであろう。²⁶⁾

著書 *Dissertation* の後部では“*obscure light*”の代わりに“*invisible light*”という言葉が用いられているが、いずれにしても、ハットンは、これを、光・熱・火に関する自分の見解にしたがって解釈し、自分の理論の論拠として取り上げたのである。彼は言う。

光と熱がともに放射されるとか、光が放射されていないときに実験〔装置〕の焦点に現れるように見えるのはこの放射熱であるとか、主張してはならない。²⁷⁾

これは、ピクテーの実験のことを指しているのである。ピクテーは、ソシュールの実験を繰り返して、二つの凹面鏡を向かい合わせて配置し、その一方の焦点に熱い物体を、他方の焦点に温度計を置いて、温度計の示度が上昇することを観察した。そして、これを説明して、この実験では、熱い物体から放射熱が出て、それが2枚の凹面鏡で反射して温度計のところに集まるのだと述べた。

ハットンはしかし、熱が空間を伝わるということは認めえなかった。彼の見解では、光と熱とは、その“移動の様式”(modes of translation)においても、“物体に対する性向”(affections for bodies)においても、全く相違しているからであった。

光と熱と電気とは、太陽物質の別々の変容として、すべて転換可能であるように見える。

しかし、これらの三つは別物なのであって、混同されてはならない。²⁸⁾

熱は、物体と反応することなしに、つまりその物質と結合することなしに、物体中を移動させられることはない。しかし、……光は、その進行にさいして、物体の、重さをもつ物質に影響されることがない。したがって、光は、透明な物体中を、全く真空な空間中と同じように、自由に通過するのである。²⁹⁾

このようなわけで、ピクテーの実験においてもハットンの実験においても、熱ではなくて“*obscure light*”が放射されていたのだとハットンは主張する。彼はその議論をさらに次のように進めている。

われわれは今、特異な種類〔の光〕を考えている。それは、不可視で、物体を熱する力によってのみわれわれが認めうるものである。しかし、光は、物体の物質と結合することなしには、すなわちその物体中で化学的に反応し合うことなしには、物体を熱することはできない。したがって、物体の表面で反射されることなく、その中に透入して行ってその物質と結合する大きな力をもっているために、可視性はない、と考えられる種類の光があるのである。³⁰⁾

ハットンの *Dissertation* は7 Partsから成るが、以上はすべて、そのPart IIとPart IIIの最初の部分とに記されている事からである。ここで、この著書のParts I～IVに表われている彼の光と熱の理論をまとめると、次のようになるであろう。光は、空間と透明物体中を自由に通過し、物体の表面で反射させられるが、熱は、放射されることもなく、反射することもない。不可視で大きな加熱力をもつ特異な種類の光があつて、それは、物体中に透入してその物質と化学的に結合することによって物体中に熱を生じさせる。熱は、“太陽物質”と重さのある物質とが結合したものである。この“太陽物質”は、太陽および熱い物体から、光の形態をとって放射される。³¹⁾このような見解に立ってハットンは、不可視の光の放射ではなくて熱の放射を考えたピクテーその他の研究者を批判しているのである。

Dissertation のPart Vでは燃焼の問題を論じ、Part VIでは、“太陽物質”に重さや慣性があるかどうかを論じて、重さも慣性もないと結論している。³²⁾ここには、光、熱、“太陽物質”、燃素などに関するハットンの考えが詳しく記されているが、議論は込み入っており、必ずしも一貫したものとはなっていないように見受けられる。

しかし、最後のPart VIIには、ハットンの“*obscure light*”と関連のあるきわめて重要な記述がある。すなわち、彼は、太陽光線の各色の加熱力を比較する実験を示唆しているのである。

太陽の光は完全で白色すなわち複合光である。われわれは、そのより単純な種類とこの複合光とを、それらの加熱力に関して比較してみたいと思う。すなわち、先に火の光について見出したのと同様に、単純な種類〔の光〕ではその可視力に比して加熱力が複合光の場合よりも大きいかどうか、という問題である。したがって、複合光のそれぞれの種類について、比較すべき白色の複合光と、見える強さが同じときの加熱力を測っ

て調べるために、われわれはまずこの複合光を分けなければならない。³³⁾ 複合光を分ける方法としては、プリズムの使用と色フィルターの使用とがあると記してから、実行が可能でさえあるならばプリズムの方がずっと完全であるとハットンは述べている。³⁴⁾ そして、研究者たちがこのような実験を試みるようにと促している。

Part VIIの終りに近い部分には、次のようなことも記されている。

私は長いこと、光の性質に関してある考えをもってきた。それについてはここで述べるのが適当であろう。その考えのひとつは、プリズムで分けた太陽光の七つの基本的な光の性質を、物体から出る複合光の分解できる各種類と比較して研究するということである。³⁵⁾

この種の実験をハットン自らは行なわなかったけれども、太陽光と物体から出る光とについて、プリズムまたは色フィルターで分けたその各色光の性質を比較研究することの意義を彼が認めていたことは、以上の記述から十分に推定されるところである。

これまで見てきたように、ハットンの光と熱の理論は、“太陽物質”と燃素を前提する奇異なもので、それによれば、熱は、光とは異なって、放射もしなければ反射もしないのであった。しかし、そのハットンは、炭の火の赤い光と焰の白い光とを比較することにより、また、白熱物体が冷えていくとき、もはや可視光を出さなくなった後にもなお加熱力のある不可視の光を出しているのを見出すことにより、“*obscure light*”を発見したのである。

ところが、ハットンはその著作中にこれらの実験の詳細な記述も定量的な結果も与えていない。“*obscure light*”を屈折率との関係で示すということもしていない。そのうえ、“*obscure light*”に関する記述はいずれも、彼の、複雑で理解しがたい光および熱の理論とからみ合っただけなされているために、せつかくの新発見も、新発見たる所以が明らかではないのである。しかし、それにもかかわらず、この“*obscure light*”を、加熱力の大きい光、さまざまの色と屈折性の“段階”における赤光部分を超えた光、人間の視覚領域を超えた光、としてハットンが認識している以上、これは、彼による赤外線の見つけと認めてしかるべきものであろう。そして、先にも指摘したように、紫外部にも光や加熱力が存在する可能性を彼は示唆していたのである。

なお、これは筆者の今後の調査に俟たねばならぬところであるが、これまで赤外線の見つけ者とされてきたウィリアム・ハーシェルが、ハットンの“*obscure light*”から示唆を得たとか、太陽からの光と地上物体が出す光とについてプリズムおよび色フィルターを用いて各色光の加熱力を調べるというハットンの示唆からヒントを得たとかいうことは、十分にありうることであると考えられる。1800年に天文学者のハーシェルは、望遠鏡で太陽を観測するさいに対象がよく見えてしかも眼をいためないようにするためには何色のフィルターが最も適しているかを調べる目的で、一連の実験を行なった。彼は、一方で、プリズムで分けた太陽光線の各色の部分に温度計を置いてそれぞれの“加熱力”を測り、“加熱力”がスペクトル

全体にわたってどのように分布しているかを明らかにし、他方では、顕微鏡のもとで、スペクトルからのそれぞれの色の光線を当てて細かい対象物を見る場合の“照明力”を比較した。こうして、ハーシェルは、実験の目的である最適なフィルターの色を見つけることができたのみならず、実験の過程で、“太陽のものにも地上のものにも、対象物を可視にする力をもたぬ熱線がある”³⁶⁾ということを見出したのである。

ハーシェルは最初、熱線と光線は同質のものと考えていたが、4編におよぶ一連の論文の最後のものにおいて、熱線は光線と異なると結論している。ハットンが、それとは反対に、“*obscure light*”は光の一種であって決して熱の放射線ではないと主張し続けていたことはすでに見たとおりである。両者とも、赤外線に関する理解にはなお不十分な点が少なくなかったが、ハットンの“*obscure light*”もハーシェルの“*invisible rays*”も、今日われわれが赤外線と呼ぶものを指していたことは明確である。

従来、赤外線の発見はウィリアム・ハーシェル(1800年)に帰せられており、筆者自身もこれまでその見解をとってきたが、³⁷⁾以上によって明らかにされたとおり、この発見は、その捉え方がいまだきわめて粗略であったとはいえ、1794年のジェイムズ・ハットンのものと言われてしかるべきであろう。

[註]

- 1) 渡辺正雄, 「大学教育における科学史の意義」, 『大学研究ノート』(近刊予定)
- 2) これらの事例については、例えば次の著作を参照されたい。
 万有引力の概念: バターフィールド著, 渡辺正雄訳, 『近代科学の誕生』(講談社)下巻, pp. 41~68.
 太陽の光とろうそくの光: 玉虫・木村・渡辺 編著, 『原典による自然科学の歩み』(講談社), pp. 12~20.
 電池の電流と発電機の電流: 渡辺正雄, 『文化史における近代科学』(未来社), pp. 182~202.
- 3) Masao Watanabe, “James Hutton’s ‘*Obscure Light*’ – A Discovery of Infrared Radiation Predating Herschel’s –,” *Japanese Studies in the History of Science*, No.17, 1978, pp. 97~104.
- 4) James Hutton, *A Dissertation upon the Philosophy of Light, Heat, and Fire*, Edinburgh, 1794, xxiv + 326pp.
- 5) William Herschel, “Investigation of the Powers of the prismatic Colours to heat and illuminate Objects; with Remarks, that prove the different Refrangibility of radiant Heat. To which is added, an Inquiry into the Method of viewing the Sun advantageously, with Telescopes of large Apertures and high magnifying Powers,” *Philosophical Transactions*, 1800, pp.255~283; “Experiments on the Refrangibility of the invisible Rays of the Sun,” *Ibid.*, pp.284~292; “Experiments on the solar, and on the terrestrial Rays that occasion Heat; with a comparative View of the Laws to which Light and Heat, or rather the Rays which occasion them, are subject, in order to determine whether they are the same, or dif-

ferent," *Ibid.*, pp.293 ~ 326 (Part I) & pp.437 ~ 538 (Part II).

- 6) Patsy A. Gerstner, "James Hutton's Theory of the Earth and His Theory of Matter," *Isis*, Vol.59, 1968, pp.26 ~ 31; "The Reaction to James Hutton's Use of Heat as a Geological Agent," *The British Journal for the History of Science*, Vol.5, 1971, pp.353 ~ 362.
- 7) John Playfair, "Biographical Account of the late Dr. James Hutton, F.R.S. Edin.," *Translations of the Royal Society of Edinburgh*, Vol.5, 1805, Part 3, pp.39 ~ 99 (とくに p. 81).
- 8) 例えば, Thomas Thomsonはこう記している。ハットンがその見解を述べる仕方は「あまりにも特異なので, 自然そのものから科学の秘密を取り出すことの方が, この哲学者の著作からそれを掘り出すことよりも困難だという場合は, きわめて稀である。」(*Encyclopaedia Briatannica, Supplement to the Third Edition*, Edinburgh, 1801, "Chemistry," I, i, p.287.) また, John Playfairは, 彼が書いたハットンの伝記の中で次のように述べている。ハットンの「推論は, それを厳密に論理的なものにしようとするために, かえって紛糾してしまっていることがよくある。また, 議論の移り行きは, 配列に関する著者の特異な考え方のために, しばしば, 唐突で意外のものとなっている。」(Playfair, *op. cit.*, pp.61 ~ 62.)
- 9) J.R.Partington & Douglas McKie, "Historical Studies on the Phlogiston Theory. - III. Light and Heat in Combustion" (*Annals of Science*, Vol.3, 1938, pp.337 ~ 370)は, 'Phlogiston as Modified Solar Light (Hutton, 178 1792 ~ 4)' という項 (pp.366 ~ 370) でハットンの *Dissertation* (1794) を取り上げてはいるが, そこに彼の赤外線発見を見てはいない。
- 10) *Dissertation. op. cit.*, pp.36 ~ 37.
- 11) James Hutton, *Dissertations on Different Subjects in Natural Philosophy*, Edinburgh, 1792, x1 + 696pp.
- 12) もっとも, それに全く言及しなかったわけではなく, *Dissertations* (1792), *ibid.* の p.473, p.492 などには, この問題に関する短い記述が見られる。
- 13) Marc-Auguste Pictet, *Essai sur le Feu*, Geneva, 1790, xii + 212pp.
- 14) W. B[elcombe] (tr.), *An Essay on Fire*, London, 1791, xi + [3] + 304pp.
- 15) *Dissertation* (1794), *op. cit.*, p.38.
- 16) *Ibid.*, p.40.
- 17) *Ibid.*, pp.40 ~ 41.
- 18) *Ibid.*, p.39.
- 19) *Ibid.*, pp.41 ~ 42.
- 20) *Ibid.*, pp.42 ~ 43.
- 21) *Ibid.*, p.43.
- 22) *Ibid.*
- 23) *Ibid.*, p.44.
- 24) *Ibid.*
- 25) *Ibid.*, pp.57 ~ 58.
- 26) *Ibid.*, p.57.
- 27) *Ibid.*, p.47.
- 28) *Ibid.*, p.48.
- 29) *Ibid.*, p.49.
- 30) *Ibid.*, pp.59 ~ 60.
- 31) *Ibid.*, pp.33 ~ 34, & 45.
- 32) *Ibid.*, pp.274 ~ 275.

- 33) *Ibid.*, pp.309 ~ 310.
- 34) *Ibid.*, p.310.
- 35) *Ibid.*, p.324.
- 36) Herschel, *op. cit.*, p.507.
- 37) 渡辺正雄・藤井恵子, 「光と熱に関するウィリアム・ハーシェルの研究」, 『物理学史研究』 Vol.6, No.4, 1970, pp.1 ~ 19; Masao Watanabe, "William Herschel on Light and Heat: A Heritage of Newtonian Science," *Proceedings of the XIVth International Congress of the History of Science*, No.2, Tokyo, 1975, pp.341 ~ 344.

Forming and Learning Scientific Concepts

— Some Historical Examples, Including Hutton's Discovery of Infrared Radiation —

Masao WATANABE*

Students encounter a variety of scientific concepts in the course of their scientific education. These concepts are usually presented in our textbooks in a highly consolidated form. This may be the quickest way to introduce new concepts, but it is not necessarily the way to ensure that the student comprehends them well. For a better and deeper understanding of a scientific concept (as of science itself) it is often more helpful to observe, in more or less detail, the historical process by which the concept was formed. This will not only help the student to grasp the basis of the concept and to see the development of science itself against the broader backdrop of history, thought, and culture, but it may also reveal the attractions of science to new categories of student. The present paper draws upon the history of science for certain examples of the formation of critical concepts. It is hoped that they may prove useful in connection with the above approach, particularly as it is tried and evaluated in practice.

New scientific concepts are not solely the products of scientific investigation. On the contrary, in many cases they are formed by means of analogy within a framework of existing concepts. Indeed, scientific concepts and theories have been based on a very wide variety of pre-existing concepts. These range from the broadest and most basic, including the prevalent world views and the concepts of nature that were accepted when the particular scientific enquiry was initiated and promoted, to much more restricted and specific concepts, applicable only to certain phenomena.

The concept of universal gravitation, for instance, was formed in accordance with an extension of the concept of magnetism. At a time when the magnetic compass was finding effective use in navigation, experimental studies of magnetism, particularly those by William Gilbert, and the accumulated experience of the navigators who discovered the dip of the compass, established that the earth itself was a huge magnet. This made it easy to formulate a kind of magnetic world view that assumed, not necessarily correctly, that magnetic forces acted through space between the earth and the moon and between the sun and the planets. This played an essential role in the formation of the concept of universal gravitation. Thus, Newton expressly distinguished between universal gravitation and magnetism in describing his law of universal gravitation in *Principia*, a distinction that we hardly feel need be made today.

In some cases, on the other hand, a distinction was originally inferred that is completely discounted today. When Newton studied the nature of sunlight and the coloured rays into which

* Affiliated Researcher, Research Institute for Higher Education, Hiroshima University/Professor, History of Science, The University of Tokyo.

it could be resolved by a prism, he felt it necessary to repeat the experiments with the light of a candle and of ordinary culinary fire before he could assume the identity of the phenomena of reflection, refraction, etc. Until the late sixteenth century, the celestial and terrestrial regions were considered to be entirely different, and therefore celestial light such as sunlight might very well have been quite different from light originating in terrestrial bodies.

A similar example may be taken from the work of J. P. Joule. When he discovered “Joule’s Law” concerning the heat generated by the electric current from batteries, he doubted that the same relation would hold for the electric current from a generator. In his mind, he associated the heat of chemical reaction with the electric discharge between atoms in reaction. Therefore, in addition to the differences between the sources of electricity, there was presumptive “evidence” for a difference between the heating effect of “Voltaic Electricity” which was chemical in origin and of “Magneto-Electricity” which was not chemical at all. However, when present-day students study the reflection and refraction of light, or the heating effect of an electric current, they need not be concerned over the particular source from which the light or electricity comes.

The last detailed example cited in this article concerns Hutton’s discovery of infrared radiation, based on the author’s recent findings. This will supply the reader with an instance of a scientific inquiry in progress, in which the discovery was barely made and the new scientific concepts were still fluid. James Hutton, who is known as the founder of modern geology, in expounding the theories embodied in his work, *A Dissertation upon the Philosophy of Light, Heat, and Fire* (1794), mentioned his experimental discovery of “the *obscure* light,” a kind of invisible light that was endowed with great heating power. This could, in fact, only be infrared radiation. Hutton’s book was published six years before William Herschel’s celebrated papers in which he announced the discovery of his “invisible rays” and because of which he has been regarded as the discoverer of infrared radiation. But Hutton’s discovery predated Herschel’s. Hutton was led to his discovery of “the *obscure* light,” when he compared the heating power of “the red light from a fire of coals” and “the white light of flame,” and when he noticed the fact that, as an incandescent body cooled, it continued to radiate invisible light that had a great heating power even after visible light ceased to be radiated. Hutton, however, held rather peculiar theories of light, heat and fire, which presupposed the existence of phlogiston and “the solar substance.” He did not seem to have fully realized the significance of his discovery and did not give a full account of his experiments in his *Dissertation*, where he was more concerned to argue for his theories against the recently proposed theory of *calorique*. Thus, his discovery of infrared radiation, “*obscure* light,” seems to have escaped the notice both of his contemporaries and of posterity. However, despite his primitive perception, Hutton deserves to be acknowledged as one of the earliest discoverers of infrared radiation. It is even possible, as the present author supposes, that Herschel derived some suggestions from Hutton’s mention of “*obscure* light.”