

連載

恒星天文学の源流【12】

星の進化論とHR図表 その1

～忘れられた先駆者 ウォータストンとマイヤー～

小暮智一（元京都大学）

1. はじめに

第三の話題は星の進化論とHR図表の成立である。本論に入る前に、進化論の源流を概観しておこう。全体的な参考書はいくつかあるが[文献1-4]、その中でジャン・ルイ・タスールとモニック・タスール夫妻の著書「太陽と恒星物理学の歴史」[4]は優れた概要を与えている。その著の中で彼らはこれから取り上げようとする恒星天文学の源流に当たる時代を「パイオニアの時代」(1840-1910年)と「形成の時代」(1910-1940年)とに分けている。ここでは恒星進化論の歴史という観点から、「パイオニアの時代」をさらに前後期に分けて、前期を「忘れられた先駆者の時代」(1840-1870)と後期を「ガス球論発展の時代」(1870-1910)と呼んでみたい。

これらの時代はもとより多くの研究者によって築き上げられたが、ここでは何人かのパイオニアたちの人物と天文学を通して主題の流れを浮かび上がらせてみたい。

パイオニア時代の前期はジョン・ジェイムス・ウォータストンとロバート・マイヤーに代表される。1840年代、太陽はまだ固体かあるいは液体ではないかと考えられていた時代であった。パイオニアの2人は共に太陽はガス球であると大胆に仮定し、気体運動論や熱力学の基礎を築きながら、太陽の熱源と進化の問題に迫っていた。ウォータストンは「気体運動論」(1845)の論文のなかで収縮説による太陽熱の発生を提唱し、一方、マイヤーはエネルギー保存則の提唱とともに、「天体の動力学」(1845)のなかで太陽の熱源として

彗星の落下による力学的エネルギーの可能性を指摘している。しかし、2人の業績は長い間うずもれ、世に知られるようになったのはようやく1860年代以降であった。業績を認められないパイオニアとして2人の生涯には似通ったところがある。

後期のパイオニア時代を代表するのは理論面ではジョナサン・H・レーンとオーガスト・リターであろう。レーンはワシントンの特許局に勤めながらのアマチュア研究者、リターは大学で構造力学などを担当する工科系研究者と、どちらも物理学、天文学から離れた研究者であった。レーンは「太陽の理論的温度」(1870)という論文を書き上げた。これはレーンの天文学に関する唯一の論文であるが、この論文は自己重力のもとで球状に保たれるガス体の全体的平衡状態を取り扱った最初の論文である。一方、リターの天文学の仕事は1878年から1883年に集中し、この間に「太陽大気の高さに関する考察とガス状天体の内部構造について」という18編からなる長大な論文をまとめている。そのなかで彼はガス球の平衡、振動、安定性の問題に取り組み、星の進化については収縮論の立場から星は高温度星に向かった後、低温度星に向かうという2方向進化理論を提唱した。

当時の主流はヘルムホルツ収縮論に基づいて、星は高温度星として誕生し、収縮冷却の道を辿るという一方向説であった。観測的立場から2方向進化論を主張したのはノーマン・ロッキヤーであった。彼は星の分光タイプが温度上昇期にある星と下降期にある星に

分類できると考え、2 方向進化論を提唱する(1887 年)。彼は太陽熱源として流星落下説をとり、星の誕生としては低温の流星体の集合によるとした。従って、星は低温巨星として誕生し、中心への落下によって加熱され、星は高温に向かう。やがて星は観測される最高温度に達すると、それ以後、低温の赤色星に向かうという進化過程である。

パイオニア時代の後期を飾るのは理論的にはロバート・エムデンの「ガス球論」(1907)であり、観測的にはエイナール・ヘルツシュプルングとヘンリー・N・ラッセルによる HR 図の成立である。HR 図の成立(1907 - 1913 年)は「パイオニアの時代」から「形成の時代」への転換期に当たる。ヘンリー・ラッセルはエムデンによって整備されたヘルムホルツ収縮論に基づいて、HR 図上における星の進化経路が赤色巨星から青色星を経て、主系列を赤色へと向かうことを示した。これは収縮説による進化論の総仕上げであったが、収縮説には乗り越えたい矛盾があった。それは太陽や星の年令である。

太陽の年令は収縮説によると高々数千万年程度であるが、一方、地層や化石から推測される地球の年令は十億年を超える。太陽も地球と同程度と考えざるを得ないが、収縮論にはそれを乗り越える手段はない。太陽の長期にわたる熱源はどこにあるのであろうか。これは「形成の時代」を迎えるに当たって最大の課題であった。

この課題の解決に向けて重要な発見があった。ラザフォードによる原子核の発見(1911)と、アインシュタインの相対性理論による質量と光の等価性(1905)である。エディントンは「恒星内部構造論」(1926)のなかで物質消滅過程を新しい熱源として提唱した。この説は一時期進化論の主流となり、多くの理論的研究があった。しかし、そのあと、1930

年代には原子核物理学が大きく発展した。中性子や陽電子の発見、核反応における遷移確率の計算などによって、いよいよ熱源問題の解決が近付いて来た。それを先導したのはフォン・ワイゼッカーの「星の内部における元素変換について」(I:1937, II:1938)とハンス・ベークによる「星の内部におけるエネルギー生成」(1939)という 2 人の論文である。これによって熱源問題に解決の道が開かれ、1940 年代からはタスール夫妻によれば「恒星天文学の黄金時代」に入る。

この第三話では、上に挙げた人たちを中心に、その人となりと天文学を訪ねながら、恒星天文学源流期における理論と観測の歴史の一端に触れて見よう。

2. ウォータストン (John James Waterston, 1811 - 1883)

2.1 その生涯

ジョン・ジェイムス・ウォータストンは 1840 年代に気体を構成粒子間の相互衝突という観点から気体運動論の基本法則を導き、それを太陽に応用して恒星進化論の夜明けを告げたパイオニアである。彼は第 1 に太陽をガス体と見なして気体運動論を応用し、第 2 に収縮説に基づいて太陽熱の起源について画期的な考察を行っている。どちらも 19 世紀後半になってようやく広く認められた見解である。しかし、ウォータストンの業績は長い間埋もれていた。パイオニアとしてウォータストンの味わった不遇な扱いと悲劇的な生涯を探ってみよう[4, 5]。

ジョン・ジェームス・ウォータストンはスコットランドのエディンバラ近郊でローソク工場を経営するジョン・ウォータストンと妻ジェーン・ブレアとの間に生まれた 9 人の子供の中の第 6 子である。家は富裕ではなかったが文学、科学、音楽を愛する家風があり、子

どもたちはそれぞれ人前の教育を受けることが出来た。ジョンはエディンバラ高校を卒業すると、地元の土木会社で働きながらエディンバラ大学に進学した。ここで彼は数学、物理、化学から解剖学まで学んで科学への広い知識を身につけている。

彼は19才(1830)で大学を卒業するとき、重力の力学的起源として、遠隔作用の代わりに粒子の衝突による近接作用を提唱する論文を書いている。この論文は誤っていたが彼のその後の気体運動論の背景を形成した1つの機縁になったと自ら語っている。

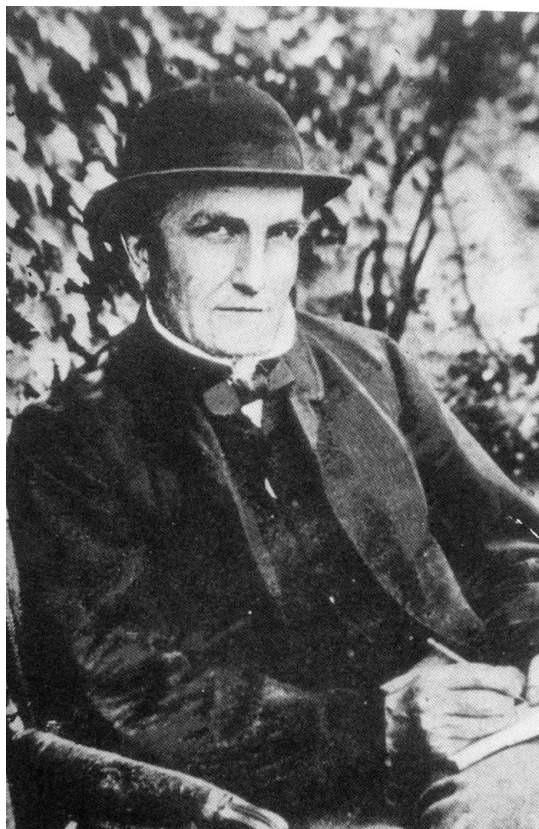


図1 ジョン・ジェイムス・ウオータストンの肖像 46歳頃の肖像[4] (p. 70, Fig. 3.2)



図2 イギリス東インド会社の本店のあったボンベイ(ムンバイ)の街並み。

図は1888年に建てられたボンベイの中央駅(チャトラパティ・シバージー・ターミナス)前の広場。この付近には市庁舎をはじめイギリス領時代に建てられた建築物が多い。

(出典: wikipedia: チャトラパティ・シバージー・ターミナス駅)

1832年、ロンドンに移り、ジェイムス・ウオーカー土木会社に職を得るが、仕事は鉄道路線調査だったので地方まわりが多く、自由な時間が少なかった。しかし、その間にも工事計画の図形法の考案などで注目されていた。この会社で3年働いた後、海軍水路部に移り、フランシス・ボーフォール(Francis Beaufort)の指導の下に数学と物理学の研究を進める。1839年(28才)のときボーフォールの推薦によってボンベイ(現ムンバイ)の東インド会社付属の海軍兵学校の講師となる。ここで1857年まで約20年間働くが、この間は自由な時間が多く、物理、化学、天文学、心理学など広い分野に関心を持ち、その成果をまとめている。

インド滞在中にウオータストンが最初に取り組んだのは熱力学であった。1843年に彼はその成果を「心的機能に関する考察」(Thoughts on the Mental Function)という表題で自費出版している[6]。この中には気体運動論に関したいくつかの重要な公式が含まれているが、ウオータストンは科学界での付き合いが少なく、しかも、題名が悪かったので当時はほとんど問題にされなかった。

そこで彼はこの書の内容を発展させ、1845年に「気体の運動理論」(正確には「運動状態にある、完全な弾性を持つ自由な分子によって構成される媒質の物理学について」と題した長文の論文 [7] をロンドン科学協会会報に投稿するが、受理されなかった。閲読者のルボック (Sir J.W. Lubbock) は「この論文はノンセンス以外の何者でもない」と酷評している。論文は著者の手に戻らず、協会の保存文庫にしまい込まれてしまった。不幸にも彼は論文のコピーを手元に置かなかった。彼の心に受けた傷は大きかった。彼はなおボンベイに留まり、1857年に故郷のエディンバラに戻ってくるが、その後は失意と孤独の日が続き、次第に体調を崩していった。

1883年、ウオータストンは突然姿を消した。彼の死は謎に包まれている。6月のある日、エディンバラ近郊の水辺に散歩に出たまま、その後の彼を見かけた人はいない。死因については心臓発作とか、目まい症状などによって水に落ち、溺れたのではないかと推測されたが、彼の遺体はついに見つからなかった。

2.2 気体運動論

ウオータストンは独力で気体運動論の基本原理の研究を進めていた。ボンベイに移住した1840年代初期にはすでに基本的法則として、気体の温度、圧力、分子の運動エネルギーに関係するいくつかの公式を導いていた。現在の記法によって主なものを挙げてみよう。

(a) 気体の圧力 P は分子密度 N 、分子の重さ M 、および、分子の平均二乗速度 $\overline{v^2}$ に比例する。すなわち

$$P = NM\overline{v^2}$$

(b) 複合気体においては各分子の平均速度 $\overline{v^2}$ はその分子の重さ M に反比例する。

$$\overline{v^2} \propto \frac{1}{M}$$

これはエネルギーの等分配法則についての最初の記述である。

(c) 個々の気体分子の運動エネルギーは $\frac{1}{2}M\overline{v^2}$ であるが、気体全体の熱エネルギー

は温度に比例する。この考察に基づいて完全気体に対し、次の法則を得た

$$\frac{PV}{T} = \text{定数}$$

これは実験的に得られたボイル・シャルルの法則(1787) ($PV/T = \text{一定}$) を分子運動論から理論的に導いたものである。

1840年代というウオータストンの時代には、熱とはまだ、カロリック (caloric) と呼ばれる質量をもたないで物質が物体のなかに入り込む現象であると考えられていた。熱を分子運動に起因するとする気体運動論は革新的な理論だったのである。これらの成果は「心的機能に関する考察」(1843) [6] に含まれているが、上述したように研究者社会からはなんの反応もなかった。

2.3 太陽の研究と収縮仮説

インド在職中は自由な時間がたっぷりあった。気体運動論のほかに物理、化学や生理学など広い分野で思索を深めていたが、なかでも太陽と太陽系天体には深い興味を示していた。太陽について最大の問題は熱源であった。ウオータストンは太陽の莫大なエネルギーは通常の化学反応では説明できないことを具体的に示し、熱源としてはラプラスによって提唱されていた太陽系生成の星雲説を発展させて、太陽自体の収縮による力学的エネルギーの熱への変換が最も妥当であると考えた。彼のこの収縮説は王立協会会報に投稿した1845年の論文に含まれていたが、この論

文は前述したように受理されず、協会の倉庫に埋もれたままだった。

彼はボンベイにおいてなおも天文学の研究をすすめ、「星食予報の図形法について」(1843) [8]、「3回の観測によって彗星の位置を決定する直接法について」(1845) [9]などの論文を公表している。これらの研究が認められて1852年には王立天文協会のメンバーになっている。

1853年に一時帰国した折、彼はロンドンの文芸協会で「宇宙における力学的過程」という一般公演を行っている [10]。これは重力収縮によって変換されたエネルギーが分子に活力 (*vis viva*) を与えて、太陽の熱と光を支えるという理論で、1845年に不採用とされた論文の一部をなすものであった。この講演のなかで彼は次のように述べている：

「この活力理論はラプラスによって提唱されている星雲仮説とよく調和するようと思われる。太陽を構成するガス分子の強力な活動性は引力による収縮の結果と見なされる。」

「若し太陽が均質に収縮したとすると、半径 3.3 マイルの収縮によって、太陽放射の約 9000 年分をまかなうことが出来る。」

この講演には1つのエピソードがある。ドイツの生理学者であり、エネルギー保存則の提唱者としても知られていたヘルマン・フォン・ヘルムホルツ (Hermann von Helmholtz) が、この講演会に出席していてウオータストンの収縮説に大きな印象を受けたことである。彼は早速その説をその後の一般講演で紹介した。簡単な計算によって、太陽は収縮による熱で輝いているとすると、原始星雲から現在の太陽半径に収縮するまでの時間は 2200 万年であると示した。ヘルムホルツは、収縮説はウオータストンによると断ったにもかかわらず、この講演の反響は大きく、その説はヘルムホルツ収縮説と呼ばれるようになった。

この講演はウオータストンにとって不幸であった。彼はますます、失意になって、1857年にエディンバラに戻ってきた。それでも、気体論や天文学への関心は絶えることなく、研究生活を続けていた。この時期に彼は「彗星の尾の形成について」(1858) [11]、「太陽放射の測定法について」(1861) [12]などの論文を公刊しているが、そのなかで注目されているのは太陽熱量計の設計、製作と、それを用いた太陽観測である。彼の作成した設計図を図3に示そう。この熱量計によって太陽放射量と地球大気の吸収量を導き、ほぼ妥当な値を導いている。こうして彼は生涯の最後まで天文学への関心を保ち続けていた。

ロンドン科学協会の文庫に眠っていたウオータストンの1845年の論文は1891年にレイリー卿 (Lord Rayleigh) によって「発見」され、翌年によく公刊された [13]。この発見に付いてレイリーは次のように述べている：

「(この論文には)現在広く受け入れられている理論にむけて大きな進展が含まれている。投稿の時点で公刊されなかったのは(熱力学)理論の進展を10年から15年も遅らせた極めて残念なことであった。」

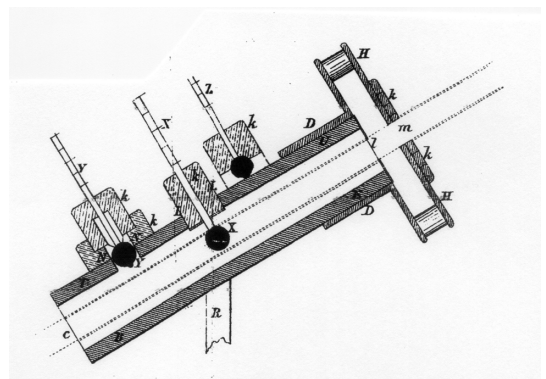


図3 ウオータストンの設計した太陽熱量計 [12]

3. マイヤー (Julius Robert von Mayer, 1814 - 1878)

3.1 その生涯

ウオータストンと同じ時期にドイツではユリウス・ロベルト・フォン・マイヤーがエネルギー保存則の発見、太陽の放射冷却に対する熱源の推論など先駆的研究を進めながら、ウオータストンと同じように不遇な扱いを受けた。ここではその生涯と天文学への貢献について振り返ってみよう [4], [14]。

マイヤーは1814年11月、ドイツのハイルブロン(Heilbronn)で薬剤師の息子として生まれた。ハイルブロンはハイデルブルクからネカー河を70 kmほど遡った上流の静かな田舎町である。自然環境にも恵まれていたが、マイヤーは子どものときから物理的な科学実験に興味をもち、種々の電気装置や空気ポンプの製作を楽しんだりしている。



図4 ユリウス・ロベルト・フォン・マイヤー肖像 出典: ([4] p. 69, Fig. 3.1)

地元の高校を卒業すると、父の薦めによってチュービンゲン大学の医学部に進学する。チュービンゲンはハイルブロンからネカー川をさらに100 kmほど遡ったところにある。大学は1477年創立という古い歴史をもち、この町は学生が人口(7万人)の3割を占めるというドイツの古い大学都市である。若者の町であったから、学生の中には羽目をはずすものも多かったのであろう。若き日のマイヤーもその一人であった。大学で禁止されていた派手な色の服装を着用し、徒党を組んでいたのが露見して、仲間とともに一時、警察に拘留され、全員が大学から1年間の停学処分を受けた。

彼はこの期間を利用してスイス、フランスなどの旅行に出かけ、オランダ領東インド(現インドネシア)まで足を伸ばしている。1838年に無事に卒業して医師となり、ハイルブロンに戻って診療所に勤めるが、東インドへの思いが募り、1841年にはオランダの3本柱帆船の船医としてジャカルタへの航海に出る。この旅の途次、1つのエピソードがあった。ジャカルタ港に近づいたころ、ヨーロッパからの船員に出血した人がいた。マイヤーはその血が著しく赤みをおびていることに気づいた。念のため他のヨーロッパ船員についても調べたが例外なく強い赤みを示していた。その理由として彼は、血液は酸素を運び、人はその酸素の燃焼によって体温を保つ。北のヨーロッパでは人は体温を保つために多くの熱を発生させるが、熱帯ではより少ない熱量で済む。そのため、酸素を運ぶ赤血球の消費が少なく、そのため血液も赤いのではないかと考えた。マイヤーは後年このエピソードを振り返って、それが自然界の熱現象に興味を抱く契機となったと述べている[15]。

実際、彼はヨーロッパに帰る船の中で熱の種類や運動との関係、無機自然界における熱

の起源やエネルギーの保存などについて思いをめぐらし、帰国してすぐ1842年に第1論文として「無機自然界における『力』について」を書き上げている[16]（ここで『力』とは現在のエネルギーである）。この論文はエネルギー保存則を示唆するもので、リービッヒ化学年報1842年版に掲載されたが化学界からの反応はなかった。

熱エネルギーと力学的エネルギーの等価性はヘルムホルツ（Hermann von Helmholtz）やジュール（James Prescott Joule）の発見とされ、エネルギー変換に関するマイヤーの業績は長らく無視されていた。彼の失意は大きく、次第に精神を蝕むようになっていった。彼は1842年にレジーネ・カロリーネ・クロスと結婚し、7人の子供をもうけていたが、1848年には2人の幼い子供があいついで死亡するという悲運があった。こうしたことが彼の失意と重なって1850年、彼はついに自殺を図って窓から飛び降りる。このときは足の骨折で済んだが、精神の痛みは深く、周囲の進めに従って精神科病院に入院して治療に専念する。幸い、病状は収まり、また、その間に彼の業績に対する科学界からの評価も次第に高まり、退院した1860年以降は、彼を取り巻く状況も大きく変化していた。1859年にチュービンゲン大学は物理学における業績を認めて彼に名誉学位を授与していた。こうして彼は元来のロベルト・マイヤーに戻り、再び、研究生活に入る。ハイルブロンで自宅でワインの栽培を楽しむなど静かな余生を送り、1878年に結核のため64才で永眠した。

マイヤーの研究は物理化学現象に対する熱力学的考察が中心であったが、天体現象に対しても大きな関心を持ち、熱源と気体運動という観点から、1848年には「天体の動力学」[17]を公表している。ここにもマイヤーの忘れられた一面があるので節を改めて紹介することにしよう。

3.2 熱と運動の等価性、エネルギー保存則

19世紀初頭から1840年頃にかけて、物質の変換過程に関する実験が相次いだ。熱の発生についても化学変化によるもの、電流、磁気的作用によるもの、落下体の衝突など力学的原因によるものなど、多様な相互変換が知られるようになっていた。それは新しい科学時代の到来であった。物理学者であり、サイエンスライターであったメアリー・サマーヴィル（Mary F. Sumerville）は啓蒙書「物理諸科学の連関について」（1834）のなかで、

「現在の科学の進歩は、・・・、かけ離れた科学分野を結びつけるという傾向において際立っている。・・・その結果、どの分野においても他分野の知識がなければ熟達を望むことが出来なくなっている」（杉山 [18]）

と述べている。

こうした潮流の中でマイヤーは「原因は結果に等しい」という論理の連鎖を重ねて、自然現象の変化を結ぶ連鎖の原因としてあるものの「力」が不滅であり、さまざまな物質変換の中で「力」は一定の割合で現象の中に現われるという結論に達した。彼はすでに述べたように血液中の酸素の発熱量という現象から「力」の普遍性を着想しているが、彼はその普遍性を、無機質を含む、自然界一般の現象に当てはめることが出来ると考えて、その見解を「無機的自然における『力』（force）について」[16]という論文のなかで展開した。

そのなかで彼は「力」の普遍性と共に仕事に変換するときの「熱の仕事等量」を導き出している。ここで「力」を「エネルギー」に読み替えればエネルギー保存の法則になるが、当時のマイヤーの論文は定性的な過程の推論に基づいているので、このときの論文がエネルギー保存則の発見者と見なしうるのかについては疑問が残っていた。彼自身はこの発見の重要性に気づいていたが、それをアピールす

る才能が充分でなかった。翌年の 1843 年にはジュールが定量的に熱の仕事等量を示したので、ジュールが発見者であるとする人もいたが、現在はどちらが先というより、熱と運動の等価性は両者によって発見されたというのが通説になっている。両者の論争については村上陽一郎編の「近代熱学論争」[18]に譲りたい。

なお、マイヤーは当時の熱現象実験の結果に基づいて、落下する物体の仕事量 W と、それによって発生する熱量 Q を比較し、熱の仕事等量 $J = W/Q$ を測定し、理想気体の

1 モルに対する現在の値 $J = 4.1855 \text{ (J/cal)}$ に近い値を得ている。また、その際、定圧比熱 C_P と定積比熱 C_V との差は一定であることを見出している。式で表わすと

$$C_P - C_V = R$$

となる。ここで R は気体定数である。この式はその発見にちなんでマイヤーの関係式とも呼ばれている。

3.3 太陽の熱源

マイヤーは巨大な発熱体としての太陽にも注目していた。そして、1848 年、彼にとっては生涯の困難な時期であったが、「天体の動力学」を公刊し、太陽の熱源、黒点と光球、さらには地球の潮汐力や地球内部の温度などを論じている。また、この年、ハイルブロン公会堂で開かれた講演会 [20] でも彼の基本的な考え方を披露している。

ここでは太陽の熱源と進化について「天体の動力学」に従って彼の思考に触れてみよう。この論文は「どんなに輝く物体でも光と熱の放射によって温度と光度を低下させ、熱源がない限り、やがては冷えて輝きを失う。」という序論で始まる。次いで、それでは太陽の熱源はどのようなものであろうかと考える。熱源として 2 つの可能性が考えられる。一つは石炭の燃焼のような化学反応である。他は力学的過程である。圧縮、振動、摩擦などの仕事から熱が発生する。すでに前節で述べたように熱と仕事は互いに変換可能であり、同等である。太陽の熱源はどちらのタイプであろうか。それを見るには、まず太陽の放射する熱量を正しく測定する必要がある。

マイヤーは太陽の放射する熱量として、プーイエ (Pouillet) が自ら発明したレンズ系日照計によって測定した太陽熱量(今で言えば太陽常数)を引用している。地球大気による吸収を半分とすると太陽放射熱の総量が推定

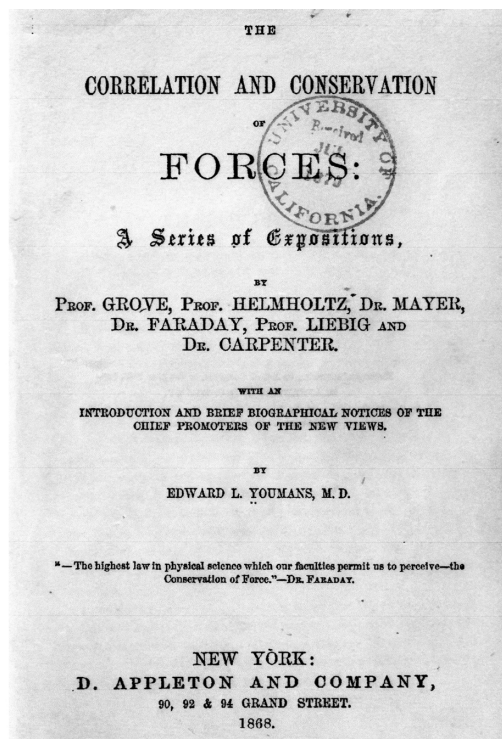


図 5 熱力学とエネルギー保存に関して

1868 年に英訳出版された論文集の表紙
この中にマイヤーの 3 つの論文「無機的世界の力」、「天体動力学」、「熱の力学的等価性」が収められている。(出典：
<http://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/19177#>)

できる。太陽を高温の水蒸気で構成されるガス球と仮定すると、熱源がない限り、太陽温度は毎年 1.8°C 低下し、わずか 3000 年で 5000°C も低下する。一方、この熱量を石炭の燃焼で補おうとすると、太陽はわずかに 5000 年で燃え尽きてしまうだろう。従って化学反応で太陽光度を維持するのは不可能である。

それでは力学的熱源としてどんなものが可能であろうか。太陽はほとんど真空中を自転しているので、周囲の媒質との摩擦による熱は到底熱源とはならない。最も有望なのは物体の落下であろう。落下によってえられる活力（エネルギー）は物体の（質量） $\times$ （速度）² に比例する。従って、彗星や小惑星のような小天体でも落下速度が大きいため、発生する熱量は石炭燃焼効率の 5000 倍から 10000 倍に達する。

こうしてマイヤーは彗星、小惑星、流星物質などの小天体の絶えざる落下が太陽の主要な熱源であると考えた。これらの小天体は地球でも絶えず観測されており、太陽系空間には充満しているだろうと考えた。

しかし、太陽の熱源が外部物体の落下によるとすると、太陽質量は増加しなければならない。質量が増加すると惑星の軌道運動を加速する。適当な落下率を仮定すると、地球の恒星年は毎年 5000 万分の 1 の割合で短縮することになる。これは長期的な観測によって測定可能な値であるが、地球ではそうした加速は観測されていない。これは太陽の質量が一定に保たれていることを示している。そこにはなにか自然界の調和が存在するのではないかとマイヤーは考えた。それでは調和とは何であろうか。彼にも具体的なアイデアはなかったが次のように述べている。

「ニュートンは、光は微粒子である、と唱えているが、今日では波動説が主流である。しかし、光の放射が何らかの形で質

量損失に関係しているのではないか。」

いまで言えば太陽風にあたるプロセスを暗示しているように見える。もちろん、全くの推測に過ぎなかったし、それについては彼もその後触れていない。

一方、外部物体の衝突の証拠としてマイヤーは黒点現象をあげている。当時、1840 年代、太陽の表面現象についてはかなりのことが知られるようになっていた。太陽黒点（暗部、半暗部）、粒状斑、白斑などとその多彩な変動である。マイヤーは観測家ではなかったので、主にジョン・ハーシュルの記述に基づいて、これらの現象を考察している。

黒点について出現から消滅までの多様な変動のなかで、彼が目したのは太陽面上における黒点現象の大きい変動の速度と、また、太陽面の高い表面温度である。粒状斑や白斑内の急速運動と共に、これらの現象は太陽表面が固体や液体ではありえず、気体でなければならないと結論した。これが太陽をガス体と考える重要な根拠となっている。

それでは黒点の起源は何であろうか。マイヤーは太陽系小天体の太陽面への落下現象であると考えた。黒点がしばしばグループを作ることから、何か列を作った小天体の連続的落下ではないかと推論したが、それはあたかも 1994 年に観測された木星表面へのシューメーカー・レビー第 9 彗星の衝突のようなものであったのかも知れない（図 6）。また、黒点域が赤道に近い領域に限られていることも黄道面と関係していると推察している。

小天体はつめたい物質と考えられており、太陽表面を炎の大洋と考えると落下天体は、しばらくは低温領域として暗く見えている。それが黒点である。加熱蒸発したガスは黒点を取り巻く白斑である。こうしてマイヤーは小天体の太陽面落下が太陽の主要な熱源であり、その直接的証拠が太陽黒点や白斑現象であると主張した。なお、余談であるが、1994

年 8 月にオランダで開かれた国際天文学連合 (IAU) 総会ではシューメーカー・レビー第 9 彗星衝突の特別報告会が開かれ、広い波長域での観測が報告された。筆者もこの会合に顔を出していたが、可視域撮像の報告を行ったカラーアルト天文台やハッブル宇宙望遠鏡などの観測者たちは揃って「衝突痕は太陽黒点に良く似ている」と表現していた。マイヤーの推察もまんざらではなかったようである。

「天体の動力学」ではさらに潮汐作用についても触れている。潮汐を一種の振動と見なすと、それが継続するには何らかのエネルギー源が必要である。こうしたエネルギー保存則から地球、月の軌道運動の変化を考察している。マイヤーは海水の潮汐のみならず地殻の潮汐も考え、また、月と地球の相互作用も考慮した最初の理論的考察を行っている。マイヤーは潮汐理論においてもパイオニアであった [21]。

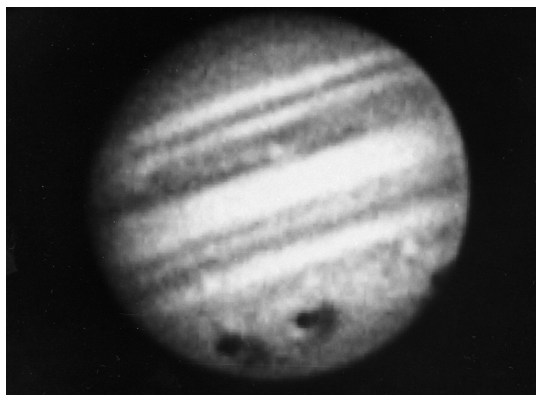


図 6 木星に衝突したシューメーカー・レビー第 9 彗星の痕跡

1994 年 7 月 20 日、美星天文台の 101cm 望遠鏡で撮影された。彗星の核は木星の南緯 43 度付近に次々に衝突した。(大島修氏ほかによる撮影)。マイヤーが黒点現象と考えたのはこのような衝突であった。

文 献

- [1] Agnes M. Clarke, 1902, A Popular History of Astronomy during the Nineteenth Century, A. and C. Black Publ., London. (19 世紀天文学史)
- [2] Gingerich, O. 1984, Astrophysics and twenty-century astronomy to 1950: Part A., Cambridge U. Press. (20 世紀前半天文学史)
- [3] Milton, H. Thomas 2008, The History of Astronomy and Astrophysics, A Biographical Approach, VBW Publishing Inc. (天文学者伝記集)
- [4] Tassoul, J.-L. and Tassoul, M. 2004, A Concise History of Solar and Stellar Physics, Princeton University Press. (太陽と恒星の天体物理学通史)
Chap. 3. The Time of Pioneers, 1840 – 1910
Chap. 4. The Formative Years, 1910 – 1940
Chap. 5. The Golden Age, 1940 – 1970
- [5] O'Conner, J. J. and Robertson, E. F. 2008, John James Waterston. (伝記) (<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/history/Printonly/Waterston.html>)
- [6] Waterston, J. J. 1843, Thoughts on the Mental Function (心的機能に関する考察) 自費出版
- [7] Waterston, J. J. 1845, Submitted to Proc. Roy. Soc. London (当時、受理されなかった論文。[13] に再掲する)
- [8] Waterston, J. J. 1843, MNRAS, 6, 83–84, On a graphical method of predicting occultations.
- [9] Waterston, J. J. 1845, MNRAS, 7, 17–19, On a direct method of determining the distance of a comet by three

- observations.
- [10] Waterston, J. J. 1853, The Athenaeum, No. 1351, On the dynamical sequence in Kosmos.
- [11] Waterston, J.J. 1858, MNRAS, 19, 29–30, Thoughts on the formation of the tail of a comet
- [12] Waterston, J.J. 1861, MNRAS, 22, 60 – 67, An account of observations on solar radiation.
- [13] Waterston, J.J. 1892, Philosophical Transaction of the Roy. Soc. London, A. 183, 1 – 79, On the physics of media that are composed of free and perfectly elastic molecules in a state of motion. (これは1845年に不受理になった論文) 表題は「運動状態にあつて、完全な弾性を持つ自由な分子によって構成される媒質の物理学について」である。
- [14] Robert von Mayer, Wikipedia (伝記) http://en.wikipedia.org/wiki/Julius_von_Mayer
- [15] Mayer. J. Robert 1851, in The Correlation and Conservation of Forces, edited by E. L. Youmans, 1868, D. Appleton and Co., NY. p 316 – 355, The mechanical equivalence of heat.
- [16] Mayer. J. Robert 1842, Liebigs Annalen der Chemie, 1842 年版, Remarks on the forces of inorganic nature. 原論文は The Correlation and Conservation of Forces, edited by E. L. Youmans, 1868, D. Appleton and Co. 社刊、p 250 – 258 に採録された(図6)。邦訳は「近代熱学論集」(村上陽一郎編、朝日出版社)に「生命なき自然界における力についての考察」として掲載されている。
- [17] Mayer. J. Robert 1845, Celestial Dynamics, in The Correlation and Conservation of Forces, edited by E. L. Youmans, 1868, D. Appleton and Co., NY. p 259 – 315. (太陽の熱源、潮汐摩擦などの考察)
- [18] 杉山滋郎、「熱学の展開」、村上陽一郎編、近代熱学論集、旭出版社。
- [19] Mayer, J. R. 1841, Remarks on the forces of nature (Cited by Lehninger, A. Bioenergetics – The molecular basis of biological energy transformation, 197
- [20] Mayer, J. Robert 1848, Beiträge zur Dynamik des Himmels in populären Darstellung, Heilbronn Johann Ulrich Landherr (ハイルブロンで行われた一般講演)
- [21] Brosche, P. 1998, Science Tribute 12月号, December, Understanding tidal friction : A history of science in a nutshell. (マイヤーの潮汐摩擦の理論の紹介)

小暮智一 (元京都大学)