

20世紀初期における放射圧測定の考察

小 山 慶 太

1. はじめに

光は古くから人間の尽きない興味の対象であった。その本性についても、長いこと粒子説と波動説を中心に、さまざまな議論が展開されてきた。現代においても、光を統一的に扱える完全な理論は存在しないが、歴史を振り返ってみると、光の本性について一区切りをつけたのは、1873年の Maxwell の電磁波説と1905年の Einstein の光量子（光子）仮説であろう。

Maxwell は自らの電磁気理論に基づき、電磁波が物体に当たると、吸収または反射される際に圧力を及ぼすことを示した。これを放射圧（光の圧力）と云う。一方、1876年には、Bartoli が熱力学の第二法則からやはり放射圧の存在を予測し、定量的にも Maxwell と同じ結論を出している。また、量子論に基づけば、光の圧力は光子気体が物体に衝突することによって生じると解釈することもできる。気体の圧力との対応で考えると、光子説の方が直感的にはわかりやすいかもしれない。

しかし、19世紀末から20世紀初めにかけては——光量子仮説が発表される以前あるいは発表されても定着するまでは——光は波動と解釈され、圧力もまた波動説によって説明されていた。おまけに、Maxwell と Bartoli が計算した放射圧はきわめて微弱だったため、その検出は困難を極めた。その辺の事情を1905年にイギリス物理学会の会長講演を行った Poynting は次のように述べている¹⁾。

百年前、まだ粒子説が支配的だった頃の方が、光を波動と考える今日よりも、光の圧力を簡単に説明できる。実際、粒子説に立てば、光の圧力を予想するのは自然であり、18世紀にはそれを検出しようとする多くの試みがなされた。しかし当時の人々は圧力をかなり大きく見積っていたが、それでも現在われわれが知っている値のわずかに二倍に過ぎず、当時の実験方法ではとても、微弱な光の圧力を検出することはできなかった。しかし、18世紀の哲学者（物理学者）が今日では可能になった精度の高い測定を遂行し、Lebedew や Nichols & Hull が行った素晴らしい実験を実行できたとしたら、そしてさらに陰極線や放射性物質の発見によって示された粒子の放射を知っていたとしたら、Young と Fresnel が光の粒子説を退け、代わりに波動説を打ち立てるのには、もっとも大きな困難を伴ったことであろう。

注釈は不要であろうが、18世紀はまだ光の粒子説が支配的であった。それが19世紀に入り、Young, Fresnel などの研究を通して、波動説優位の状況に変わって行くわけであるが、もしも18世紀に光の圧力が正しく検出されたとしたら、それは粒子説をさらに強固なものとし、波動説台頭の前に大きく立ちはだかったであろうことはさして想像に難くない。

さて、20世紀の初めにおいて Poynting をしてこのように云わしめた放射圧の測定を行ない、定量的な議論が行なえるデータを初めて得たのは、さきの引用文にも登場した Lebedew(1901年) および Nichols & Hull (1903年) であることが知られている。

実験が困難である理由は、言うまでもなく放射圧の絶対値がきわめて小さいことであるが、同時に測定の際混入してくるラジオメータ効果（光によって暖められた物体にまわりの気体分子が衝突することにより生じる

力)が肝心の放射圧よりも桁違いに大きいこともあげられる。1873年 Lebedew らに先駆けて測定を行った Crookes の実験では、ラジオメータ効果が放射圧の 10^5 倍も大きかったことが報告されている。なお、Crookes は放射圧の測定には成功しなかったが、このラジオメータ効果を発見することになった。

そこで問題は、いかにして気体の影響を取り除くかと云うことになり、これが、放射圧測定を成功させる重要な鍵となる。この点については、Lebedew および Nichols & Hull の実験ではそれぞれ独自の工夫がなされているが、本稿では、さらに Poynting の実験 (1910年) も加え、それぞれの実験方法を比較しながら、当時の物理学の発展段階において放射圧検出がどのようになされたのかを考察してみることにする。また、この時代は古典物理学から現代物理学へ移り変わる過渡期にさしかかるわけであるが、そのような歴史の流れが光の研究にどのように映し出されるのかについてもふれてみたいと思う。

2. Lebedew の実験

実験が行われた順序に従って、初めに Lebedew を取りあげよう。彼は19世紀末から20世紀初めにかけて継続的に研究を行なったが、その成果をまとめた形で初めて発表したのは、1901年 *Annalen der Physik* の論文 “Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes”⁽²⁾ においてである。

本稿で論じる実験すべてに共通することであるが、その測定原理は、ある程度排気した容器内に置いたねじり秤に光を当てて、放射圧を決定しようとするものである。となると、前節で述べたように、ラジオメータ効果を除くするもっとも手っ取り早い方法は、容器内を真空にしてしまうことである。そこで、Lebedew はとにかく高い真空を実現することに努めた。

彼自身の言葉を借りると、論文の中で次のように測定原理を説明している⁽³⁾。

Maxwell は電磁気学の著書の中で、「真空内に吊るした小さな薄い金属板に光を照射すれば、光線の力学的作用を観測することは、不可能ではない」ことを指摘している。

このような Maxwell の提言に従って、放射圧測定に理想的な条件をつくり出すことを Lebedew は考えたわけである。光を当てるねじり秤の羽根には、厚さ0.02~0.1mmの白金、アルミ、ニッケルと0.01mm以下の雲母を用いている。また、真空度を高めるために、Kahlbaum ポンプを使用して 10^{-4} mmHgまで排気し、さらに補助的手段により実験条件を最適なものに近づけることを試みた。その結果、実験誤差の範囲内で Maxwell と Bartoli の予想に一致する放射圧を測定したと結論している。

しかし理論的にその効果を予想した Maxwell は、あくまでも理想的な実験条件を提示したわけで、そのような条件が当時の技術で本当に可能であったかとなると大きな疑問が残る。この点については——そして、これがもっとも重要な点になるわけであるが——その直後に発表された Nichols & Hull の論文⁽⁴⁾で、「Lebedew の実験では、測定誤差に対する考察が十分でないこと、空気の影響がある程度取り除けたのは、高い真空をつくり出したためというよりもむしろ薄い羽根の熱伝導性がよかったからであることを指摘している。つまり、理論と一致したのは偶然であり、定性的には放射圧の存在を示したことになるが、定量的に証明したことにはならない」と論じている。

そこで次に登場したのが、Nichols & Hull の一連の研究である。彼らの論文を発表順に並べると、

- ① “A Preliminary Communication on the Pressure of Heat and Light Radiation”⁽⁵⁾ (1901年)
- ② “The Pressure due to Radiation”⁽⁶⁾ (1903年)
- ③ “Über Strahlungsdruck”⁽⁴⁾ (1903年)

となる。ただし、①については、用いたボロメータの抵抗値に起因する測定の誤りがあったことが、②、③の論文で注意されている。また、②と③は掲載誌が異なるだけで、その主要な内容は同じである。そこで、この二つの論文に基づいて、彼らの放射圧測定を次節で取り上げることにする。

3. Nichols & Hull の実験

Lebedew はひたすら高い真空度を追求したのに対し、Nichols & Hull はいささか異なる角度から放射圧の測定を試みた。彼らは、気体を完全に排気することは当面不可能であるし、だからといって気体の影響を完全に計算することも手にあまる以上、残された唯一の方法は、残留気体の作用による測定誤差が最小となるよう実験を工夫するしかないと考えたのである。そこで、次のような点が留意された。

1. 光を受けるねじり秤の表面（羽根）の反射率を、できる限り完全反射に近いものにする。これにより、光の吸収を小さくし、したがって反射板の表面温度の上昇を抑え、気体の作用を減少させることができる。一方、放射圧の方は逆に大きくなり、光が完全に反射される場合は、完全に吸収される場合に比べ放射圧は2倍になる。

2. 残留気体の圧力を変化させながら、同じ表面に一定強度の光を当て、気体の作用が最小となる圧力を捜す。放射圧は、光を当てた瞬間に最大値に達するが、気体の作用は光を当てる時間とともに大きくなり、飽和に達するには、実験条件によって決まる一定の時間を要する。したがって、光を当てる時間を短くして測定すると、気体の作用が入り込むのを抑えるこ

とが期待できる。これが後で詳しく紹介する ballistic 法である。

3. ねじり秤の羽根については、気体の及ぼす力の方向と放射圧による力の方向が、羽根の一方の面では等しく、反対側では逆になるようにする。このようにして、2つの面に及ぶ力の平均値をとれば、気体の作用をある程度相殺することができる。

以上のように Nichols & Hull の実験に臨む姿勢は、残留気体の存在を前提とした上で、その影響を放射圧が測定できるまでにできるだけ抑えようとするものである。

そこで次に、測定装置の概要を述べておこう。放射圧の測定は図1に示したねじり秤を用いて行われた。光を受けるねじり秤の羽根CとDには、直径12.8mm、厚さ0.17mm、質量51mgの顕微鏡カバーガラスが使用さ

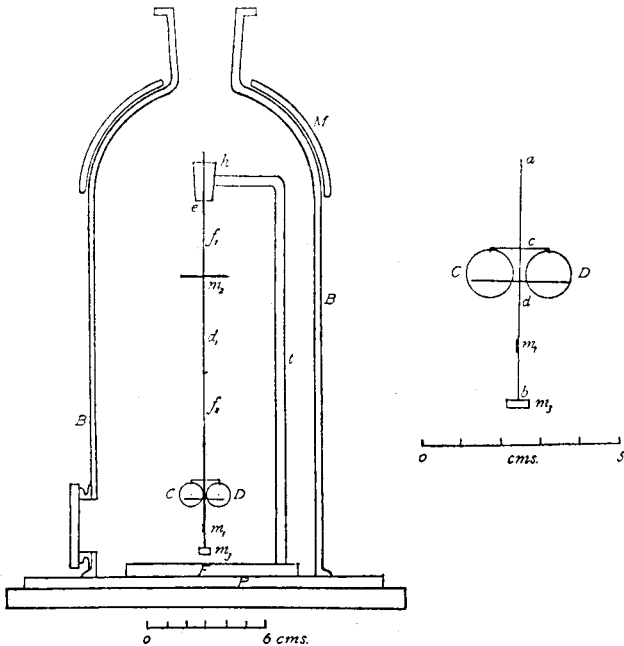


図1 ねじり秤 (参考文献(6)より)

れ、それがガラス棒の回転軸 ab に掛けられている。CとDの片面は銀でおおい、他方の面はそのままガラスを露出させておいた。 m_1 はねじり秤のふれの目盛を読み取る鏡、 m_3 は黄銅のおもりである。 m_2 とMは磁石で、Mを 180° 回転することにより、CとDの光を受ける面が反転できるようになっている。Bはガラス容器である。なお、光源にはアーク灯の白熱炭素端を用いた。

さて、実験は大きく分けて、①ねじり秤による放射圧の測定と②光のエネルギーの測定の2つの項目について行われた。Maxwell と Bartoli の理論に従えば、放射圧 p (dyn/cm²) は (光が羽根に垂直に入射する場合)、空間の単位体積中の光のエネルギー E (erg) に等しい。ただし、 E は、入射光と反射光の両方から成る。そこで、羽根の反射係数を ρ 、光速を c とすれば、

$$p = \frac{E(1+\rho)}{c} \quad (1)$$

の関係が成り立つ。そこで、①の測定で求めた p が、②の測定で求めた E を(1)式に代入した結果の p と一致すれば、Maxwell と Bartoli の理論の正しさを、定量的に証明したことになるわけである。

①放射圧の測定

ここではさきほど述べたように、容器B内の残留気体の作用を除去することが重要になる。そのためにもまず、気体の圧力を0.02から66mmHgまで8段階に分けて変化させ、気体の作用が最小となる圧力を捜している。図2は、羽根のガラス面に光を当てたときの結果である。横軸は光をねじり秤に当てる時間 (s)、縦軸はねじり秤のふれを表わしている。気体の圧力に関係なく、気体の作用は光を当て始めると急激に増加し、やがて飽和に達することがわかる。その時間は約2.5～3分である。図の8本の曲線を見ればわかるように、気体の圧力が0.05, 0.16, 2.24, 11.2mmHg のときは、放射圧の方向と気体が羽根に及ぼす力の方向は一致するが、0.02,

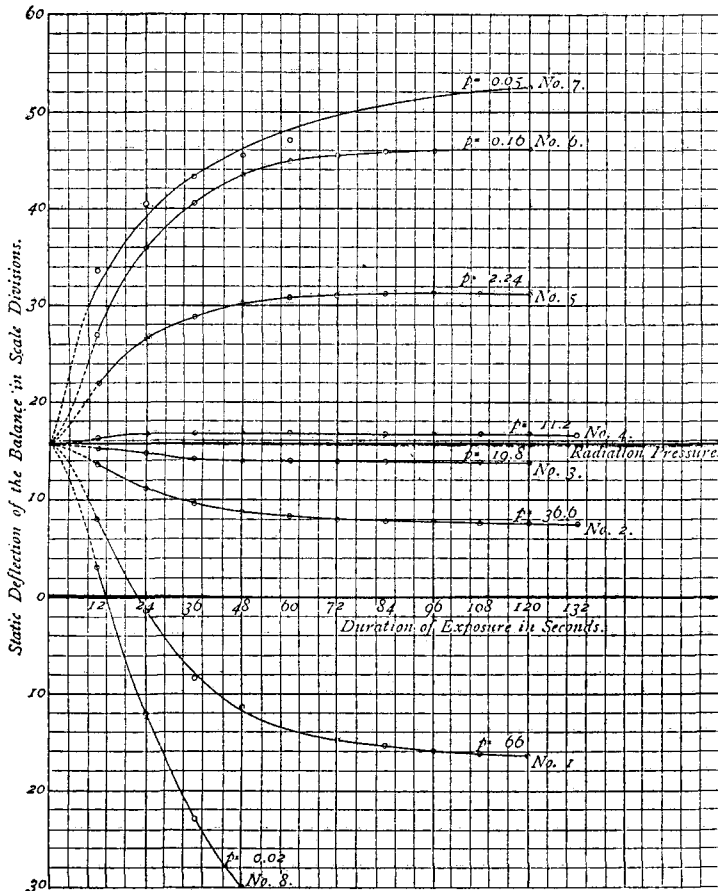


図2 光の照射時間とねじり秤のふれの関係 (参考文献(6)より)

19.8, 36.6, 66 mmHg のときは逆向きになる。ということは、この実験装置においては容器内の力が 11.2 と 19.8 mmHg の間及び 0.02 と 0.05 mmHg の間で、気体の作用が 0 になることを示している。そこで、以下の測定では前者の圧力範囲を選び、約 16 mmHg の圧力のもとですべての実験が行われた。気体が残留しているにも拘らず、その影響がなくなるというのは一見不思議に思えるかもしれない。しかし、詳しい計算はできなくて

も、諸々の実験条件の組合せにより、圧力に応じて光を受ける羽根に気体が及ぼす力の向きが、放射圧の方向に平行、反平行の二通りの場合が存在するのならば、平行⇔反平行の反転が生じる近傍の圧力では、放射圧測定に対する気体の影響は最小になる。この現象は、海岸で朝夕に生じる風にたとえたらよいのかもしれない。気体の影響を取り除くためには、気体そのものを除去しなければならない。つまり充分高い真空をつくり出さねばならない——これは誰でもそう考えるであろう。しかし、それが不可能でも、このように容器内の圧力を調節して、羽根のまわりに風状態を発生させれば、気体が存在しても気体の作用を消すことはできたのである。これは、みごとな実験のアイデアといえる。

さてもうひとつ、光を当てる時間を短かくすれば、それだけ気体の作用も小さくてすむ。これを利用したのが ballistic 法である。Nichols & Hull は6秒間——これはねじり秤の振動周期の $\frac{1}{4}$ ——光を当て、光を切った後のねじり秤の振動を測定した。

彼らは、振動の運動方程式を次のように考えた。気体の作用を無視すると——圧力をこのような条件が成り立つように調節してあるので——、運動方程式は

$$\chi \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + 2\varepsilon \frac{\partial \theta}{\partial t} = -G\theta + L \quad (2)$$

と書ける。ここで、 χ はねじり秤の慣性モーメント、 ε は減衰定数、 G は $\theta=1\text{rad}$ に対するねじり秤の糸のねじれモーメント、 L は放射圧によるモーメントである。(2)式に速度に比例する減衰項を含ませてあるが、ねじり秤の振動の振幅は、正確に指数関数に従って減衰することが実験で確かめられている。(2)式の解は

$$\theta = \frac{L}{G} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\chi} t\right) \cos 2\pi \frac{t}{T} \right\} \quad (3)$$

となる。積分定数は、 $t=0$ で $\theta = \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ より決められる。 T は振動の

周期である。また、 $t=T/4$ のとき

$$\theta = \frac{L}{G},$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{L}{G} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\kappa} t\right) \left\{ \frac{\varepsilon}{\kappa} \cos 2\pi \frac{t}{T} + \frac{2\pi}{T} \sin 2\pi \frac{t}{T} \right\} \quad (4)$$

である。一方、光を $t=T/4$ で切ると運動方程式は

$$\chi \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + {}^2\varepsilon \frac{\partial \theta}{\partial t} = -G\theta \quad (5)$$

となり、その解は

$$\theta = A \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\kappa} t\right) \cos\left(2\pi \frac{t}{T} + \alpha\right) \quad (6)$$

で与えられる。係数 A , α は (4) 式の条件より決まる。いま、小さい量を無視すると、振幅 A は、

$$A = \frac{L}{G} \left(1 + r + \frac{2}{\pi} r^{1/2} \log \frac{1}{r}\right)^{1/2} \quad (7)$$

となる。 r は減衰振動における振幅と次の振幅の比である ($r=1$ は減衰のない場合を表わす)。実験を行った圧力 (16mmHg) のもとで r を測定すると、0.783 となったので、

$$A = 1.357 \frac{L}{G} \quad (8)$$

となる。つまり、ballistic 法におけるねじり秤のふれの最大値は、ねじり秤の糸のねじれモーメントと放射圧のモーメントがつり合う角度 $\theta=L/G$ の 1.357 倍ということになる。したがって、 A を測定することにより (8) 式を通して放射圧が求まるわけである。

以上紹介したように、放射圧の測定では、気体の作用が最小となる圧力の決定と ballistic 法の採用という二段構えにより、難問であった残留気体の影響を抑えたわけである。

②光のエネルギー測定

光のエネルギー E は、銀の円板で光を受け、その単位時間当りの温度上昇を熱電対で測ることによって決定された。さらに、ねじり秤の羽根の反

表1 放射圧の測定値と計算値

	測定値(10^{-5} dyn/cm ²)	計算値(10^{-5} dyn/cm ²)
(a)	7.01±0.02	7.05±0.03
(b)	6.94±0.02	6.86±0.03
(c)	6.52±0.03	6.48±0.04

射係数 ρ も求めると、放射圧は(1)式から計算される。なお、実験はすべて3種類の光について行われた。すなわち、(a)空気を通した光(光源とねじり秤の間の光路に光学系以外の吸収媒質を置かない場合)、(b)赤色ガラスを通した光(光路にルビーのガラス板を置いた場合)、(c)水を通した光(光路に蒸留水を置いた場合)についてである。それぞれの場合について、放射圧の測定値と(1)式を使った計算値を比較すると表1のとうりとなり、両者は±1%程度の誤差でよく一致した。これによって、Maxwell-Bartoliの理論から予想される放射圧が定量的に実験で証明されたと結論されたのである。

4. Poynting & Barlow の実験

Nichols & Hull の論文から7年後の1910年になると、Poynting & Barlow による実験が発表された⁽⁷⁾。彼らもねじり秤の原理を利用している点は共通であるが、従来の方法——光を受ける表面に光が及ぼす圧力を測定——とは異なり、光源に対する放射圧——光による光源の反跳、弾丸を発射したときのピストルの反射に対応する——を測定した。光が物体に吸収されると物体は熱せられ、そこから再び光が放出される。そこで、この放射効果を検出し、光源(熱せられた物体)の反跳を測ろうという試みである。

彼らは、表面を図3に示すような状態にした4種類の円板を用意した。図の中で、Bは光を完全に吸収する(“黒色”)表面、Sは逆に完全に反射

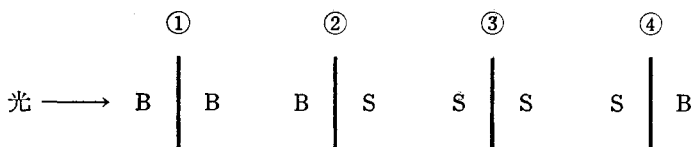


図 3

する（全く吸収を起さない）表面を表わす。

いま、真空中に置れた円板に図の左側から、単位体積 (cm^3) あたり P のエネルギーをもつ光を当てたとする。円板①、②では吸収面に光が当たることになるので、円板の温度は光の吸収と放出が等しい定常状態になるまで上昇する。定常状態に達すると、円板は受けたのと同じエネルギーを放射する。①では両面から等量のエネルギーが放射されるので、放出する光の圧力は左右の向きで、相殺される。一方、②では入射光と同じエネルギーが入射面から左向きに放出される。放射は余弦分布 ($\cos\theta$) をするとすれば、その圧力は $\frac{2}{3}P$ であるので、円板②に及ぼされる全放射圧は $\frac{5}{3}P$ となる。円板③、④は吸収を起さないので、圧力は入射光と反射光の効果の和 $2P$ である。以上をまとめると、各円板に作用する圧力は、

$$\text{①} : P, \text{②} : \frac{5}{3}P, \text{③} : 2P, \text{④} : 2P$$

となる。

しかし、実際にはこのような理想的な条件が成り立つわけではない。そこで、 r と ρ をそれぞれ入射光に対する表面 B と S の反射係数、 a と α をそれぞれ（あたためられた円板が）放出する光に対する表面 B と S の放射係数とすれば、4つの円板に対する全放射圧は、

$$\begin{aligned} \text{①} : (1+r)P, \text{②} : \left\{ 1+r + \frac{2}{3} \frac{a-\alpha}{a+\alpha} (1-r) \right\} P \\ \text{③} : (1+\rho)P, \text{④} : \left\{ 1+\rho - \frac{2}{3} \frac{a-\alpha}{a+\alpha} (1-\rho) \right\} P \end{aligned} \quad (9)$$

となる。なお、係数の間には、

$$a=1-r, \quad \alpha=1-\rho \tag{10}$$

の関係が成り立つとした。そこで、彼らは r と ρ のいろいろな値 ($r=0, 0.05, 0.10; \rho=1.00, 0.95, 0.90$) について、(9)式で与えられる①～④の放射圧と、放射圧の比 $BS/BB, BS/\frac{1}{4}(SS+BS)$ を計算した。この計算値を次に紹介する測定値と比較するわけである。

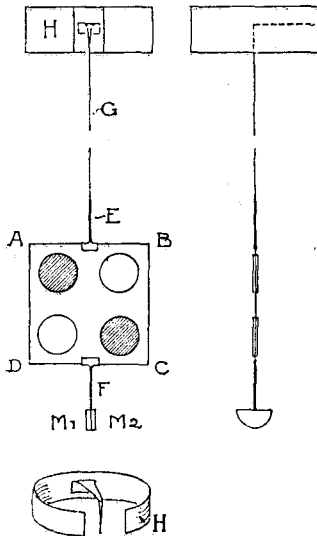


図4 PoyntingとBarlowのねじり秤
(参考文献(7)より)

さて実験では、2枚の円形カバーガラス(直径1.2cm, 厚さ0.1mm)の間に厚さ約0.1mmのアスファルト層をサンドイッチしたものを円板として用いた。このようにして作った円板は完全に不透明で、その表面はほぼ完全な黒色に近い。一方、反射面は円板の表面に銀を付着させて作った。4枚の円板は、穴をあけた雲母の板 ABCD にはめこみ、これが図4に示すようにねじり秤の役目を果たしたのである。Nichols & Hull の ballistic 法とは逆に、Poynting & Barlow の測定では

円板が定常状態に達するまで充分長い時間(20分～1時間)、光を順に4つの円板に当て放射圧を求めている。測定結果から放射圧の比を求めると

$$\frac{BS}{BB} = 1.39, \quad \frac{BS}{\frac{1}{4}(SS+SB)} = 1.58$$

となった。これを(9)式による計算値と比較して、 $r=0.05, \rho=0.95$ としたときの値、

$$\frac{BS}{BB} = 1.54, \quad \frac{BS}{\frac{1}{4}(SS+SB)} = 1.67$$

が選ばれた。

後者の方が実験との一致はよいが、これはラジオメータ効果がもっとも大きく現われる円板BBが後者には含まれないからと解釈された。なお、円板の銀でおおった表面Sについては、サーモパイルを使ってその反射率を測定しており、少なくとも96%の光は反射するという結果を得ている。

さて、放射圧の比ではなく絶対値を求めるには、光のエネルギーを決定しなければならないが、それには Nichols & Hull の実験と同様に光を受けた円板の温度上昇を熱電対で測る方法が採用されている。求めたエネルギーを用いて円板BBに及ぼす放射圧を計算すると(BBの反射率は0.05として)、その結果は(i)実験値の約90%であり、(ii)円板SS, SBの実験値のほぼ $\frac{1}{2}$ になることが示された。したがって、(ii)から放射圧の値が定量的に求まり、(i)からラジオメータ効果の大きさが評価できたという結論を得たわけである。

5. おわりに

以上みてきたように、Lebedew は Maxwell の指示に忠実に高真空のもとでの測定を試みたのに対し、Nichols & Hull は気体の作用を最小に抑える条件を見つけることを測定原理とした。また、彼らからしばらく時間をおいた Poynting & Barlow は、それまでの測定方法と異なり光源の反跳に注目している。三者ともそれぞれ独自の創意工夫をこらしているわけであり、放射圧の絶対値の小ささと当時の実験技術を勘案すると、これらの測定はマクロな現象の中で放射圧を定量的に検出できる限界を示していると云えそうである。

Lebedew の実験は、Nichols & Hull も指摘しているように当時の真空技術からすると、残留気体の影響を Lebedew 自身が結論したとより除去し得たのか否か議論を呼ぶところである。いざさか一本調子に進み過ぎた

観がなくもない。その点、Nichols & Hull は発想の転換とでも云うべく逆に初めから気体の存在を前提とし、その作用をどこまで消去できるかを追究しており、3節で述べた測定原理からも結果に対する定量的な面での信頼はかなり高いように思える。なお、1903年の報告後も気体の作用を消去する方法の研究は続けられ、Hull 単独の論文 “The Elimination of Gas Action in Experiment on Light Pressure”⁽⁸⁾ が発表されている。

三番目にとりあげた Poynting & Barlow の実験は、光が当たる面に及ぼす放射圧ではなく光を放射する物体の反跳を利用した点は新しかったわけではあるが、実験結果の明晰さから云うと必ずしもその前に行われた Nichols & Hull の実験を凌駕しているとは思えない。むしろ異なる方法により、すでに得られた結論を再確認、補強する役目を果たすと解釈すべきであろう。したがって、古典物理学の範囲内では、1903年の Nichols & Hull までで放射圧の測定は完結したとみなしてもよいであろう。

ところで、最後にひとつ見落してはならない問題があることを指摘しておこう。それは、Einstein の光量子仮説の発表が、これら二つの実験の間になされていることである。念のために整理しておくと、

- 1901年 Lebedew の実験
- 1903年 Nichols & Hull の実験
- 1905年 Poynting の「放射圧」に関する講演
Einstein の光量子仮説
- 1910年 Poynting & Barlow の実験

となる。

マクロな現象の中で放射圧を観測しようとすれば、光量子仮説を考慮したところで、具体的な実験方法に大きな変更はないかもしれないが、それにしても、圧力を考える以上、運動量をもつ光量子という新しい概念——光に対する粒子的描像——は放射圧の研究に大きな影響を与えてしかるべ

きと思われる。冒頭でも引用したように、Poynting も1905年の講演において光の粒子説と圧力の関係を強調していたほどである。ところが、Poynting & Barlow の論文を読む限り、そのような形跡は見られない。Lebedew, Nichols & Hull の研究が完全に古典物理学の範疇であったのは当然と云えるが、Einstein の発表から5年経った1910年になっても、他の分野はいざ知らず、光の圧力の研究においてさえまだ光量子という考え方が注目されたようすはない。これは、光量子仮説の受容過程を考える上でも、放射圧測定が興味深い問題になることを示している。なお、量子論の範疇で——ミクロな現象において——光の圧力が証明されるには、1923年の Compton 効果まで待たねばならなかった。

さて最近、レーザーを用いてマクロな現象の中で放射圧を調べる研究が注目され、その応用もいろいろと考案されている⁹⁾。これは——用いる光源は異なるが——、20世紀初期の研究のリバイバルとも云えそうである。レーザーに頼れば、もはや放射圧の微弱さを嘆く必要はない。これに対し、そのような強力な光源をもたない1901～10年に行われた研究では、以上述べたように、巧妙な実験原理の組合せにより勝負するしかなかったのである。そして、古典物理学から現代物理学への変わり目にあたり、量子論の世界ではなくマクロな現象においてともかく放射圧を測定したということは、末期を迎えた古典物理学の最後の意地をみるような気がする。

参考文献

- (1) J. H. Poynting, "Radiation Pressure", *Proc. Phys. Soc.* **19**, 45 (1905).
- (2) P. Lebedew, "Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes", *Ann. d. Phys.* **6**, 433 (1901).
- (3) —, *ibid.*, 436頁
- (4) E. F. Nichols und G. F. Hull, "Über Strahlungsdruck", *Ann. d. Phys.* **12**, 225 (1903).
- (5) E. F. Nichols and G. F. Hull, "A Preliminary Communication on the Pressure of Heat and Light Radiation", *Phys. Rev.* **13**, 307 (1901).

- (6) E. F. Nichols and G. F. Hull, "The Pressure due to Radiation", *Phys. Rev.* **17**, 26 (1903).
- (7) J. H. Poynting and G. Barlow, "The Pressure of Light against the Source: The Recoil from the Light", *Proc. Roy. Soc. (A)* **83**, 534 (1910).
- (8) G. F. Hull, "The Elimination of Gas Action in Experiments on Light Pressure", *Phys. Rev.* **20**, 292 (1905).
- (9) A. アッシュキン, "レーザー光の圧力" 別冊サイエンスNo.9 (日経サイエンス社)。