

H.T.Eddy と A.Bartoli による熱輻射論

On the theory of radiant heat by H.T.Eddy and A.Bartoli.

○諸田恭佑¹, 雨宮高久², 植松英穂²

*Kyosuke Moroda¹, Takahisa Amemiya², Eisui Uematsu²

Abstract: In 1876, Adolfo Bartoli studied relativity between Crookes's radiometer and radiation pressure, which based on his thought experiment. At a later time, Henry Turner Eddy introduced the thought experiment called "syren" by him and discussed second law of thermodynamics by using radiant heat in 1882. Eddy considered radiant pressure in the syren. Eddy proposed the thought experiment which was independent from Bartoli's study. The purpose of Bartoli's thought experiment is proof of exist of radiant pressure. In 1884, Ludwig Boltzmann led stefan's law theoretically through using the radiant pressure referred by Eddy and Bartoli.

1. はじめに

19 世紀の熱輻射論史は、量子論誕生につながる歴史として、天野清によって 1943 年にまとめられた^[1]。天野は 19 世紀後期の社会背景に留意しながら、黒体概念に着目して熱輻射論史を記述した。その後、広重徹、辻哲夫、高林武彦らも熱輻射論史研究を行っているが、天野の研究を踏襲している。

天野は、G.Kirchhoff の黒体概念導入から M.Planck による放射法則導出までの変遷を取り扱った。L.Boltzmann が Kirchhoff 以降初めて黒体条件を明白に認識したと位置づけ、Boltzmann が 1884 年に Stefan の法則（現在の Stefan-Boltzmann の法則）を理論的に導出したこと^[2]を、その具体的な例として取り上げた。しかし、Boltzmann による Stefan の法則導出に至る経緯は詳細に調べられていない。

Boltzmann は 1884 年の論文^[3]で「Eddy の“radiant heat as an exception of the second law of thermodynamics”^[4]についての研究報告（要約）^[5]の際に、私は E.Wiedemann の親切を介して興味深い Bartoli の論文（著書）^[6]への注意を促された」と述べているので、H.T.Eddy と A.Bartoli の研究は Boltzmann の研究の背景として無視できない。そこで、本発表では Eddy と Bartoli の研究を調査した。

2. H.T.Eddy の研究

Eddy は Clausius の熱力学第二法則に関心を持ち、1882 年の論文^[4]で syren という思考実験を提案し、その法則に反する機構を考えた。

syren は、三つの同心円盤 a,b,c が Figure1 のように平行に置かれ、それぞれの円盤上には等間隔で穴 a1 a2...an, b1 b2...bn, c1 c2...cn が空けられている。a, b, c の各穴を結ぶ直線は、Figure2 のように円盤に垂直で

はなく、斜めになっている。円盤 a の左側には熱源 A が、円盤 b の右側には熱源 B があり、A と B は等温度とする。実験では熱源 A, B から円盤に向けて入射する熱線を議論する。すべての円盤は回転しており、入射した熱線に対して各穴は相対速度 u で動いている。

A から放射された熱線は、円盤 a に垂直に入射し、円盤上にある穴 a1,c1,b1 を通り B へ到達する。この時円盤は、A から放出された熱線が各穴を垂直に通り返けられるようにしている。逆に B からの熱線は、斜めに放射されたものだけが各穴を通り A へと到達する。当然、穴を通る以外の熱線も存在しているが、それらは各円盤に備えられた完全反射体で反射し、A からの熱線は A へ、B からの熱線は B へと戻っていく。

B から出た斜めの熱線の強度は、放射面に垂直な線と熱線との間の角度を θ とすると $\cos\theta$ に比例するので、B からの斜めの熱線は、垂直に入射した A からの熱線よりも強度が弱い。その結果、A の方が B よりも低温度になるが、速度 u が十分に大きければ、それでもまだ A からの放射強度の方が B からのものより強い。

以上の思考実験を認めるならば、熱は冷たい物体から暖かい物体へ何の作用も無しに移動できることになる。これは「熱は冷たい物体から暖かい物体へそれ自身を渡すことができない」という Clausius の原理に違反している。

なお、Eddy は論文の最後で syren に対する W.Gibbs の批判を論駁している。Gibbs は、放射が回転盤の運動を妨げるような「抵抗」を生み出して syren を妨害する可能性を指摘した。この意見に対して Eddy は、反射体に対して生み出される接線方向の抵抗は非常に小さいと述べた。また抵抗があるのなら、風が風車を回すように、放射線が円盤を回すことも可能だとした。その場合、放射に対する穴の速度 u は不連続になるが、抵

1 : 日大理工・院・物理, 2 : 日大理工・教員・物理

抗の影響によって syren の動作に支障はでないと考えた。

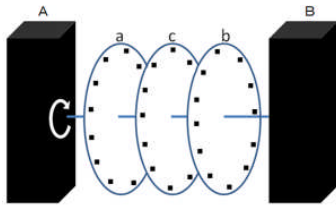


Figure 1. syrenの機構
(筆者作成)

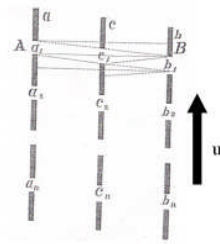


Figure 2. syren の円盤を
平行方向から見た図^[4]

3. A.Bartoli の研究

Bartoli は、1876 年に当時話題に挙がっていた W.Crookes のラジオメーター効果の原因を「熱線による反発力」に求める実験的検証を行った^[6]。結果的に因果関係は見出されなかったが、代わりに思考実験を用いて熱線による反発力の存在を検討した。

Figure3 のような同心球 A, B, C, b を考える。A と B は完全反射体、C と b は“completamente nera”完全に黒い、つまり黒体とする。なお、Bartoli はこの完全に黒いという用語は Kirchhoff の研究から引用したと述べている^[7]。

ここで、C と b が温度を持ち放射を放っているとす。まず B の殻が消失すると、b からの放射が A と b の間の空間に照射される。そして放射平衡状態に達した時点で B が復活し、今度は A を消失させ、そこから B の殻を半径が A と等しくなるまで縮小させる。この操作の間、全ての殻は常に球形に留まっているものとする。

以上述べた操作を繰り返せば b から C に熱を送ることが可能である。Bartoli はこのシステムに対して「多くの熱量を、冷たい物質から暖かい物体へ送られることが可能だろう」と述べた。

この思考実験が熱力学第二法則に矛盾していないと考えるには、完全反射体の殻が縮小した分の仕事量に対して、熱放射は同量の(収縮に対する)反発力を持たなければならないと Bartoli は主張した。

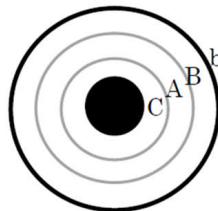


Figure 3. Bartoli の思考実験
(筆者作成)

4. まとめ と今後の課題

Eddy と Bartoli は共に熱力学第二法則に反するような思考実験を独立に提案したが、彼らの問題意識は異なっていた。Eddy は、syren を正しいと見なせば、熱

力学第二法則が原理と呼ばれるべき厳密性を持たなくなると考え、syren の正当性を論じることに終始した。その際に、抵抗が syren の動作を妨害するように働く可能性を否定している。一方、Bartoli の問題意識はラジオメーターの動作原理にあり、その原因を熱線による反発力に求めた。思考実験から反発力の理論式を導出したが、実際の現象として反発力は検出されず、反発力の効果は非常に小さいと結論した。Eddy の「抵抗」や Bartoli の「反発力」は、放射圧のことだと思われる。

Boltzmann は Stefan の法則^[2]を証明するときに、Bartoli の熱力学第二法則に反する思考実験と放射圧の理論を利用した。Eddy の理論は Stefan の法則導出に直接寄与しなかったが、Boltzmann が Bartoli の理論を利用できたのは、Eddy の研究を要約したからである。

Boltzmann がこの要約を書いた理由は明らかではないが、恐らくは、要約を作った後に編集長から Bartoli の研究を知らされたので、Boltzmann は自分の意思で Eddy の要約を作ったと思われる。彼は Eddy の要約を作ったおかげで Bartoli の研究を知り、Eddy と Bartoli の放射圧から Stefan の法則を証明することができた。

今後の課題としては、Boltzmann がどのように放射圧を利用したのかを調査したい。

5. 参考文献

- [1] 天野清：『熱放射論と量子論の起源』, 1943 年。
- [2] L.Boltzmann : “Ableitung des Stefan’schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie“, *Ann. der physik*, Vol.22, pp.291 - 294, 1884.
- [3] L.Boltzmann : “Ueber eine von Hrn. Bartoli entdeckte Beziehung der Wärmestrahlung zum zweiten Hauptsatze“, *Ann. der physik*, Vol.22, pp.31 - 39, 1884.
- [4] H.T.Eddy : “radiant heat as an exception of the second law of thermodynamics”, *Scientific Proceedings of Ohio Mechanics’ Institute*, pp.105-114, 1882.
- [5] L.Boltzmann : “Wärmestrahlung als Ausnahmefall vom zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie“, *Beiblätter. Ann.der physik*, Vol.7, pp.31 - 39, 1883.
- [6] A.Bartoli : “Sopra i movimenti prodotti dalla luce e dal calore”, 1876.
- [7] G.Kirchhoff : “Ueber das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht“, *Ann. der physik*, Vol.185, pp.275-301, 1860.