ヘリオスと輝度

—照明工学発達史の一断面—

専門会員 肥後尚志

Helios versus Luminance

(A Overview of Historical Development of Illumination Engineering)

Fellow Member Higo Takashi

ABSTRACT

A discussion of the relationship between helios and luminance shows that helios has the same concept of luminance. To date helios, the photometric concept is introduced to the photometric system on the basis of a surface light source by P. Moon, has been misunderstood for a long time.

1. はじめに

Moon の Helios (ヘリオス) と輝度についての論議が行われてからすでに半世紀近くが経過している¹⁾。この間、輝度の概念²⁾は定着を見たが Helios についてはその後、取り上げられる事もなく今日に至っている。

Helios は我が国では一度、齋藤、藤原 (以後、齋藤等と記す) により光束発散度と仮訳され³⁾⁴⁾、従来の光束発散度や輝度との間に定義上の混乱を生じたことがある。この混乱は室井の努力により一応は解消されたのだが⁵⁾、このとき Helios について十分な解釈が与えられたとは言いがたい。ことに室井は輝度と Helios は明確に異なる概念であると述べ⁶⁾、その相違を次の様に記している、

「この Helios が従来の輝度と根本的に異なるのは立体角の頂点を被測定面側でなく観測点の方におき、その立体角内に入り込む光束を単位面積当たりの光束密度で表現しようとした事にある。」

Helios に対するこの解釈はその後、再吟味されることなく今日に至っている。

しかし、1942年 J. O. S. A に発表された Moon の論文⁷⁾、照明の場の理論に関する集大成として1981年に刊行された Moon の著書 Photoc field⁸⁾に述べられている Helios は室井の述べた Helios と同一であるとは言いがたい。

そこで本文では Helios について、あらためて見直しを行うと共に若干の所見を述べたい。

2. Helios の定義

Moon は等方性の吸収の無い完全媒質内を微小面積 ds_p の発光面より発し、距離 r にある面積 ds の開口に入射または通過する放射束 d^2F を (2.1) 式で与え、このときの H を Helios と呼んでいる⁹⁾。また F は pharos と呼ばれ、Radiant pharos Fr , Luminous pharos F , それぞれの単位は [watt] 及び [lumen] である。

(2.1) 式はこの pharos に基づいた Helios の定義式である¹⁰⁾。

$$d^2F = (H/\pi) ds_p \cdot ds \cdot \cos\theta_p \cdot \cos\theta / r^2 \quad (2.1)$$

ただし、 θ_p , θ は面 ds_p および ds と r のなす角である。

次に、開口の中心が発光面 $ds_p \cdot \cos\theta_p$ に張る立体角を $d\Omega_p$ とすると (2.1) 式は (2.2) 式となる。

$$d^2F = (H/\pi) \cdot d\Omega_p \cdot ds \cdot \cos\theta \quad (2.2)$$

$$d\Omega_p = ds_p \cdot \cos\theta_p / r^2 \quad (2.3)$$

(2.2) 式より開口に入射または通過する単位面積当たりの光束 D は (2.4) 式となる。 D は pharosage と呼ばれている。

$$dD = d^2F / ds = (H/\pi) \cdot d\Omega_p \cdot \cos\theta \quad (2.4)$$

ここで、 r の方向と ds の方向を一致させると $\theta = 0$ より (2.4) 式は (2.5), (2.6) 式となる。(2.5), (2.6) 式は開口に入射または通過する pharosage D による Helios の定義式である¹¹⁾。

$$H = \pi (dD / d\Omega_p) \quad (2.5)$$

$$H = \pi \lim_{\Omega_p \rightarrow 0} (D / \Omega_p) \quad (2.6)$$

両式の π には単位が無く、radiant Helios の単位は [watt/m² · steradian] の π 倍、luminous Helios の単位は [lumen/m² · steradian]

Fig. 1 Pharos about a ray

Table 1 Concept & unit proposed by Moon

Concept	Unit
pharos F (radiant pharos Fr)	lumen (watt)
pharosage D (radiant pharosage Dr)	lumen/m ² (watt/m ²)
Helios (radiant Heilos)	brondel (herschel)

adian] の π 倍となる。このような単位名はいかにもわずらはしい。そこで、Moon はこの π のことを考慮して radiant Helios については herschel, luminous Helios については測光学の先駆者である Andre Brondel の名にちなんで brondel を単位名として用いている¹²⁾。Moon の示した概念と単位を示すと Table 1 のようになる。

3. Helios と輝度その検討

本節では Helios と輝度について検討する。輝度は測光量なので Helios は luminous Helios とする。また以下の議論は放射輝度と radiant Helios についても同様である。

国際照明用語集によれば、輝度は次のように定義されている¹³⁾。「(与えられた方向における、実在又は仮想の面上の与えられた点における) 輝度 L は式

$$L = d^2\Phi / d\Omega \cdot ds_p \cdot \cos\theta_p \quad (3.1)$$

によって定義される量。ここに、 $d^2\Phi$ は与えられた点を通り与えられた方向を含むに立体角 $d\Omega$ 内を伝搬する要素ビームによって伝達される光束； ds_p は与えられた点を含むそのビーム断面の断面積； θ はその断面の法線とそのビームの方向との間の角である。」(Fig. 2)

ここでビームの断面を開口 ds と書き換え、(3.1) 式を $d^2\Phi$ について書き直すと (3.2) 式となる。 $d^2\Phi$ は面積 ds の開口に入射または通過する光束で、その単位は [lumen] である。開口 ds を通過する光束を Helios を用いて表すと (2.1) 式より (3.3) 式となる。(3.2)、(3.3) 式はいずれも開口に入射または通過する光束を示

Fig. 2 Definition of Luminance

し 輝度と Helios が同じ概念を持つ事がわかる。また $H = \pi L$ とすると $d^2\Phi$ と d^2F は等しくなり、このとき Helios と輝度の単位はともに [lumen/m² · steradian] である。

$$d^2\Phi = L \cdot d\Omega \cdot ds_p \cdot \cos\theta_p \quad (3.2)$$

$$d^2F = (H/\pi) d\Omega \cdot ds_p \cdot \cos\theta_p \quad (3.3)$$

$$H = \pi L \quad (3.4)$$

次に、開口 ds に入射または入射する光束を測定することにより輝度を定める。開口の中心が光源面に張る立体角は $d\Omega_p$ であり $d^2\Phi$ は (3.1) 式を適用して (3.5) 式となる。

$$d^2\Phi = L \cdot d\Omega_p \cdot ds \cdot \cos\theta \quad (3.5)$$

開口 ds の照度を dE とすると (3.6) 式となり、 r の方向と ds の面の方向を一致させると $\theta = 0$ より、輝度 L は (3.7)、(3.8) 式で与えられる。

$$dE = d^2\Phi / ds = L \cdot d\Omega_p \cdot \cos\theta \quad (3.6)$$

$$L = dE / d\Omega_p \quad (3.7)$$

$$L = \lim_{\theta_p \rightarrow 0} (E / \Omega_p) \quad (3.8)$$

(3.7)、(3.8) 式は開口側から定めた輝度の定義であり、(2.5)、(2.6) 式による Helios の定義と同じ形式である。この定義は、国際照明用語集のなかで¹⁴⁾、「これは放射源が表面をもたないとき (例えば、空、放電プラズマ) に有用な形である。」と記載され、天空の輝度はこの Helios の概念で定義されている。

Moon が Helios を開口に入射または通過する光束を基にして定義した理由は物理量を定めるにはその量が測定可能でなければならない (Helios を光束を発する面側で測定により定めることは不可能である) と云う Moon の考えによるためである¹⁵⁾。

ところで、室井は Fig. 3 を用い輝度の定義に発光面側からのみ

Fig. 3 Helios and luminance

の定義を与え¹⁶⁾、Heliosについては開口側からのみの定義を与えて、立体角の取り方の相違をもとにこの両者は本質的に異なるものであると結論するとともに、輝度とは立体角の取り方が異なるものであるから Helios には新しい用語（例えば集束輝度など）を用意すべきだとも述べている¹⁷⁾。このような見解を生む所以は(2.5)式の立体角 $d\Omega_p$ に対して光束が立体角 $d\Omega_p$ を持つ錐体に収束し、convergent light cone を形成して伝搬すると言う意味を立体角 $d\Omega_p$ に持たせようとしたからではないかと考えている。Moon は Helios を定義するに当たってこの立体角 $d\Omega_p$ は光束の photometric な関係を視覚的に捉えるうえで有用であるが、光束は立体角 $d\Omega_p$ 内を収束しながら、すなわち convergent light cone を形成して伝搬する事は物理的にあり得ないのであるから、この立体角に物理的意味をあまり多大に考える必要はなく、単なる光束伝搬おける発光面と開口の位置に対する幾何学的関係を示しているに過ぎないと述べている事を想起すべきであろう¹⁸⁾。

次に、Helios と輝度の換算係数となっている π について見てみよう。

完全拡散面である等輝度 L の面光源の光束発散度を M とすると M は (3.9) 式となる¹⁹⁾。

$$M = \pi L \quad (3.9)$$

(3.9) 式における π の意味は等輝度面光源（完全拡散面）にもうけた半球の立体角であり [steradian] の単位を持つ。それゆえ光束発散度 M の単位は [lumen/m²] となる。

ここで仮に Helios を光束発散度と解釈し、 π に半球の立体角の意味を持たせると、 H/π の単位は輝度の単位と同じとなる。

輝度の概念が十分定着していたとは云い難い当時であって、齋藤等は既に定着していた光束発散度を用いて輝度の概念を表す事を意図して十分考慮の上あえて Helios を光束発散度と仮訳したのではないかと推測している。ある概念がまだ揺籃の状態にある場合、既に定着を見た概念を拡張し、適用するのは当然であろう。その意味で齋藤等のこの試みは照明工学が発達する過程における貴重な事例の一つとして評価に値するのではないかと考えている。

Moon が π を用いた理由は照明計算の単純化のためである。例えば反射率 ρ の完全拡散面上の pharosage D と Helios H との関係は数値的に $\rho D = H$ となる²⁰⁾。また、輝度 L の半径 a の円板光源より距離 h にある円板中心直下の照度 E は

$$E = \pi L [a^2 / (a^2 + h^2)] \quad (3.10)$$

となるが、Helios を用いると pharosage D は

$$D = H [a^2 / (a^2 + h^2)] \quad (3.11)$$

となり、 π を抱える事から解放される²¹⁾。

以上述べたの通り Helios と現在の照明工学の分野で広く用いられている輝度との間には明確な相違など存在しないことは明白である。

Helios は発光面、開口どちらの側から見てもその概念は輝度と同じである。すなわち、Helios は光束を発している面の物理的状态を示す測光量で輝度と同一の概念を持ち、その値は輝度の π 倍である。

4. おわりに

Helios と輝度について思う所を述べた。まとめると以下のようになろう。

- (1) Helios は輝度と同一の概念を持つ測光量（放射量）である。
- (2) Helios と輝度は根本的に異なるものであるとする見解は誤りである。

- (3) 輝度と Helios は $H = \pi L$ で結ばれる。ただし、この π は立体角の意味を持たない。

ところで、尾本はある面のある方向の平均輝度をその方向から見た単位面積当たりの光度と定義している²²⁾。国際照明用語集にも同様の定義が記載されているのだが²³⁾、光度は点光源の概念である。点光源の概念を面光源の概念に拡張することは本質的に不可能である。Moon が Helios を導入したのは Lambert の点光源に立脚した測光体系から脱却し、面光源を中心とした体系を構築する事を意図していたからである。その意味では Helios の果たした役割は多大なものがあると思うのだが、Helios が我が国におけるこれまでの照明工学の発展の過程で相応の評価を受けたと言い切れないのは誠に残念である。

筆者はこのままこの Helios が我が国だけ誤って解釈され続けられるのではないかと危惧している。Helios の解釈を再び原点に戻し、Helios が照明工学発達史の観点からも正しく認識されることを願っている。

参考文献

- (1) G. A. Fry : Illum. Eng. vol.48. no.8 (1953) p406-410.
- (2) 照明学会編：ライティングハンドブック. p6 (1987) オーム社
- (3) P. Moon. & D. E. Spencer : Lighting Design (1948) Addison-Welsley.
- (4) 齋藤, 藤原. (訳) : 照明設計 (文献(2)の翻訳) (1955).
- (5) 室井 : 照学誌. vol.50. no.2 (1966) p22-26.
- (6) 文献(5) p23.
- (7) P. Moon : J. Opt. Soc. Am. vol.32. (1942) p348-362.
- (8) P. Moon & D. E. Spencer : The Photoc Field (1981) MIT Press
- (9) 文献(8) p20.
- (10) 文献(7) p358.
- (11) P. Moon : Am. J. Phys.vol.10 (1942) p134.
- (12) P. Moon : The scientific basis of Illuminating Engineering (1961) Newyork Dover.
- (13) 国際照明用語集 第4版 (1989) 01-35.
- (14) 国際照明用語集 第4版 (1989) 01-34.
- (15) 文献(8) p18&40.
- (16) 文献(5) p23.
- (17) 文献(5) p26.
- (18) 文献(8) p13.
- (19) 例えば尾本 : 照明計算 (1936) p.15
- (20) 文献(7) p356.
- (21) 文献(8) p27.
- (22) 尾本 : 照明計算 (1936) p.12
- (23) 国際照明用語集 第4版 (1989) 01-34

(受付日1996年9月30日/採録日12月3日)

ひご たかし 肥後 尚志 (専門会員)

昭和14年2月20日生。昭和37年日本大学理工学部電気工学科卒業。昭和48年同大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。工学博士。平成元年同大教授、現在に至る。主として光放射、レーザ等の光センシング技術の研究に従事。電気学会、計測自動制御学会、等の会員。