

高屈折率スタンプルーペの光学的特性 —置き場所に関する注意点—

田邊 正明

日本ライトハウス養成部

魚里 博

大阪人間科学大学医療福祉学科

日本ロービジョン学会誌

Journal of Japanese Society for Low-vision Research and Rehabilitation

高屈折率スタンプルーペの光学的特性

—置き場所に関する注意点—

田邊 正明

日本ライトハウス養成部

魚里 博

大阪人間科学大学医療福祉学科

Optical Characteristics of a High-Refractive-Index Bright Field Magnifier

— Notes Regarding Where to Place the Magnifier —

Tadaaki Tanabe

Welfare Center for the Blind, Nippon Lighthouse

Hiroshi Uozato

Department of Health and Social Services, Osaka University of Human Science

目的：スタンプルーペは紙面に直接置く凸平レンズで、周辺光をまんべんなく取り入れるため底面で全反射した光線が凸面側に焦点を結び、レンズの近くに置いた物体で発火するおそれがある。そこでその仕組みを解析する。

方法：光路図をもとに臨界角以上でスタンプルーペに入射し底面で全反射し、凸面側から上方に射出し収束した光線の後頂点焦点距離を求めた。実際に凸面側に集光する様子をレーザー光線と発光ダイオードの光で実験して確認した。

結果：屈折率1.60の素材で作られたスタンプルーペの臨界角は38.7度、全反射した光線は直径60mm、80mmのスタンプルーペでは凸面からそれぞれ3.8mm、5.1mmに焦点があった。

結論：高度が51.3度までの太陽光がスタンプルーペに直接入射した場合凸面側に集光し、物体があると発火のおそれがある。太陽光が直接当たる窓際にスタンプルーペを置くことは避けるべきである。

(日本ロービジョン学会誌 18:91-96, 2018)

キーワード：スタンプルーペ, 臨界角, 全反射, 後頂点焦点距離

Purpose : To analyze the mechanics of a high-refractive-index bright field magnifier consisting of a convex-plano lens that is positioned over the paper to be read so that ambient light rays will be completely reflected on the bottom surface of the magnifier lens and will focus on the convex side and illuminate objects placed just below the lens.

Methods : We determined the optical path of light through the magnifier from the point where light rays entered the magnifier and measured (1) the critical angle at which the magnifier needed to be held to allow the light to be completely reflected from the bottom of the magnifier and (2) the vertex focal length of the magnifier (distance from the convex side to the point where convergence was obtained). We confirmed how light is focused on the convex side of the magnifier by actually experimenting with a laser beam and light-emitting diode.

Results : (1) The critical angle was 38.7 degrees with a refractive index of 1.60. (2) For magnifiers with diameters of 60 mm or 80 mm, the focal point was 3.8 mm or 5.1 mm respectively from the convex surface.

Conclusions : When a high-refractive-index bright field magnifier is held at an angle of less than 51.3 degrees to direct sunlight, the light rays converging on the convex side may be strong enough to ignite paper. Thus, these magnifiers should not be used with direct sunlight as the bright light source.

(J Jpn Soc Low-vision Research and Rehabilitation 18:91-96, 2018)

Key Words : Bright Field Magnifier, Critical Angle, Total Reflection, Back Vertex Focal Distance

目 的

スタンプルーペは一般にも広く普及して手に入れやすい拡大鏡であり、そのスペックはすでに明らかにされている¹⁻³⁾。日本ライトハウス、ホブニック研究所、三井化学は従来から広く使われているスタンプルーペよりも高屈折率の素材を使用することで、今まで横倍率は1.8倍が限界であったところを2倍まで上げることができた⁴⁾。スタンプルーペの形状は単純であり、紙面上に置けば拡大像が見えるため、様々な流通ルートで従来から販売されているが、その光学的特性はあまり知られていない。スタンプルーペは一般的な単レンズ拡大鏡と異なり、紙面に直接レンズを置く凸レンズと異なり、紙面に直接レンズを置く凸平レンズである。正立虚像が書面とほぼ同じ位置に生じ双眼で見ることができ、周辺光の集光作用で紙面を明るく照らすのが特徴である。周辺光をまんべんなく取り入れるため、底面で全反射した光線が凸面側に焦点を結び、レンズの近くに置いた物体が発火するおそれもある。

凸レンズの効果による発火事故は、独立行政法人国民生活センターの相談事例によると、「車内用カーテンの吸盤による収れん火災」(2012年12月27日掲載)が報告されている (URL:http://www.kokusen.go.jp/jirei/data/201212_1.html)。相談内容と原因は次のとおりである。

「相談内容：自動車の車内用遮光カーテンを紐(ひも)を通して2個の吸盤(黒)で留めていたが、吸着力が弱いのので100円ショップで購入した透明の吸盤に付け替えた。以前から車内に焦げ痕があることに気づいていたが、気にはしていなかった。先日、ドライブ中に運転席のヘッドレストから白い煙が上がり焦げ臭かったので、調べてみると、シートが焦げていた。吸盤がレンズの役目を果たしていた。

焦げ跡の原因について：シートが焦げた原因として収れん火災が考えられる。収れん火災とは、太陽からの光のエネルギーが凸(とつ)レンズや凹(おう)面鏡およびこれらと同じ作用をする物体により反射または屈折し、これが一点に集まることで可燃物を発火させる偶発性の高い火災である。

この火災は、太陽の位置、気象条件、収れんを起こす物体の向き、可燃物の位置などの諸条件がすべて重なったときに起こる偶発性の高い火災である。

東京消防庁の調べでは、東京都内で2005年に8件、2006年に2件、2007年に6件の収れんによる火災が発生している⁵⁾。

その後も、2010年に布団付近に置いていた水のペットボトルが凸レンズの役目をして、太陽の光を集めて焦点を結ばせたことで布団が燃えるという火災や、2011年には非常用として水を入れておいた梅酒用のガラス瓶が凸レンズの働きをして、太陽光線が収れんされたことによる火災などが発生している。」

また、消防防災科学センターの季刊消防の科学 2008年秋号には、「ペットボトルの「収れん」による火災事例について」のタイトルで、詳細な実験による発火に至るまでの再現内容が掲載されている (URL: http://www.isad.or.jp/cgi-bin/hp/index.cgi?ac1=IB17&ac2=94fall&ac3=5443&Page=hpd_view)⁶⁾。そのなかで虫眼鏡、ガラス玉、ペットボトルの発煙現象、無炎燃焼、発火までの時間経過が実験により表1のように報告されている。

スタンプルーペは表1ではガラス玉の範疇に入ると考えられる。しかし、収れんする方向がレンズ下方ではなく上方になるのがスタンプルーペの特徴であり、他の凸レンズとは異なった特性をもっているため、光路図をもとに近軸光線による解析を試みた。

方 法

図1に示した光路図をもとに計算により全反射する光線の臨界角を求め、臨界角以上の入射角でスタンプルーペに入射し底面で全反射し、凸面側から上方に射出した光線がレンズ面からどれくらいの距離に焦点をもつのかを求めた。更に、全反射し射出した光線が凸面側に集光する様子を発

表1 虫眼鏡、ガラス玉、ペットボトルの発煙現象、無炎燃焼、発火に至るまでの時間

種 類	発煙現象	無炎燃焼	発火
虫眼鏡	1秒18	5秒01	63秒25
ガラス玉	1秒55	10秒24	112秒03
ペットボトル	2秒03	24秒23	59秒20

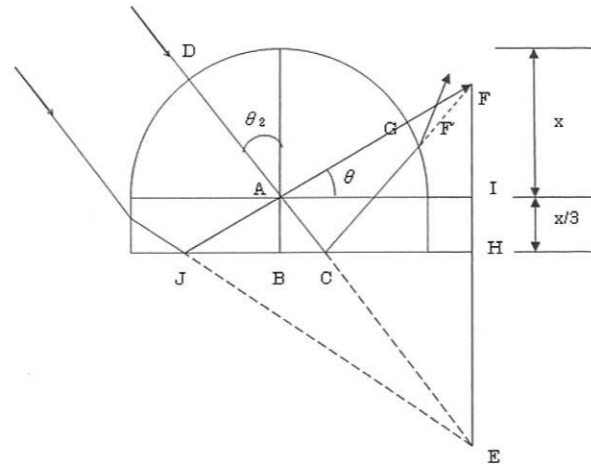


図1 スタンプルーペに入射した平行光線が底面で全反射し、レンズ上方に焦点を結ぶ様子
ただし、A：曲率中心、x：曲率半径、F'：後側焦点、 θ_2 ：入射角、 $\triangle JCF \cong \triangle JCE$ ($\because JF=JE, CF=CE$), $AB \perp JC$, $BH \parallel AI$

散せず直進するレーザー光線と発散する発光ダイオードの光で実験して確認した。更に実際に太陽光線のもとで燃焼に至る状態を確認した。

計算方法は、まずスタンプルーペの面屈折力を求める。次に臨界角以上の角度 (θ_2) で凸面に入射し、底面で全反射したレンズ中心からレンズ面に達する光線の底面からの角度を θ とし、凹面に入射するバージェンスを求めた。そして凹面で屈折されて射出する光のバージェンスを求め、後頂点焦点距離を求めた。

後頂点焦点距離 (f_v) は入射角 (θ_2) と曲率半径 (x) を変数として求めることができ、次式であらわされる。

$$f_v = \frac{5x \sin \theta_2 - 3x \cos \theta}{3 \cos \theta + 3 \sin \theta_2}$$

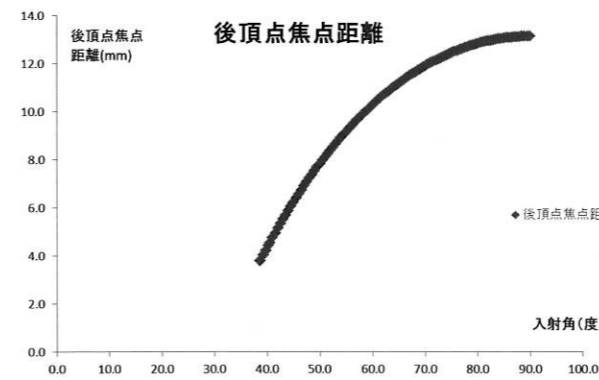


図2 入射角と後頂点焦点距離 - 半径60mmの「みてみ」の場合 -

θ は θ_2 の関数であらわされ、次のようになる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{5 \cos \theta_2 - 2}{5 \sin \theta_2}$$

全反射の臨界角、および後頂点焦点距離の公式の導出は appendix に詳述した。

結 果

曲率半径60mm、80mmの高屈折率スタンプルーペの臨界角における後頂点焦点距離を求めると、それぞれ3.8mm、5.1mmとなった。また、半径60mmの高屈折率スタンプルーペに関して、入射角が臨界角から90度に変化した場合の後頂点焦点距離の変化をグラフにすると図2のようになった。

図3では15mmの高さの透明な土台に載せたスタンプ

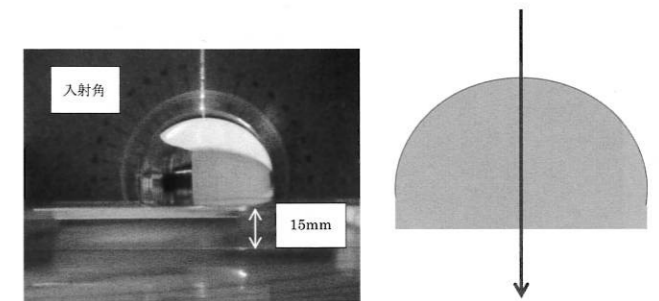


図3 15mmの高さの透明な土台に載せたスタンプルーペに入射角0度でレーザー光線を入射させた様子

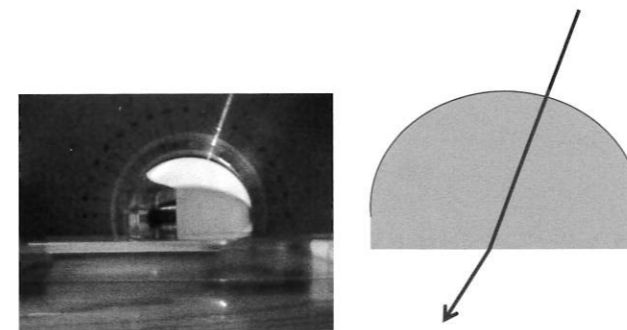


図4 20度で入射したレーザー光線が底面で屈折されてレンズ下方に照射される様子の写真とイラスト

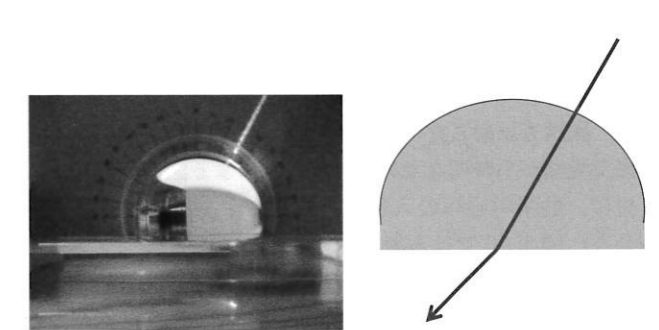


図5 30度で入射したレーザー光線が底面で屈折されてレンズ下方に照射される様子の写真とイラスト

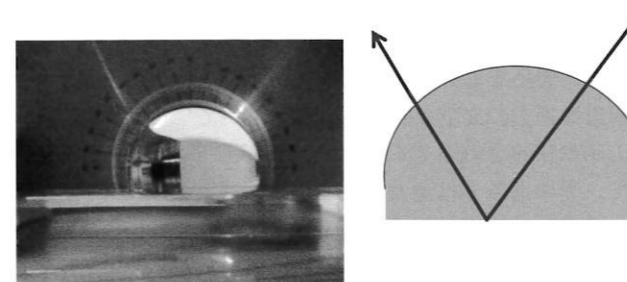


図6 40度で入射したレーザー光線が底面で全反射されて凸面側に射出される様子の写真とイラスト

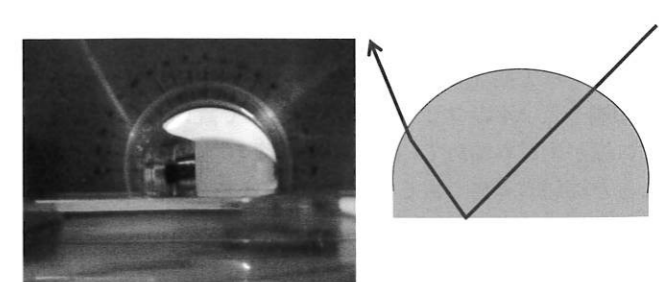


図7 50度で入射したレーザー光線が底面で全反射されて凸面側に射出される様子の写真とイラスト

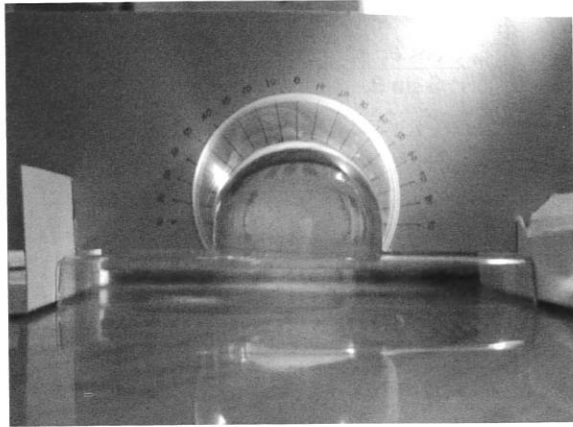


図8 入射角40度方向にある発光ダイオードによる発散光線がスタンプルーペ上方に収束する様子の写真

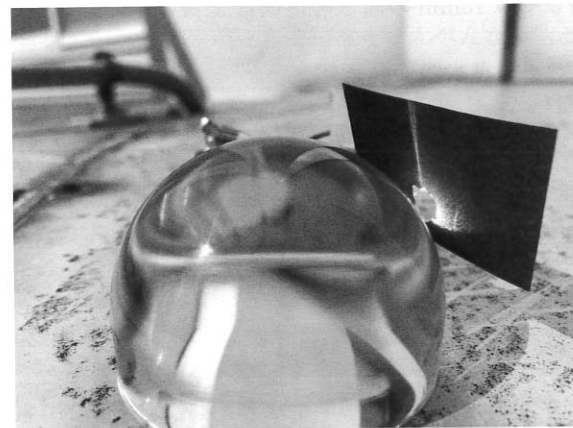


図10 無炎燃焼で穴が開き始めた状態

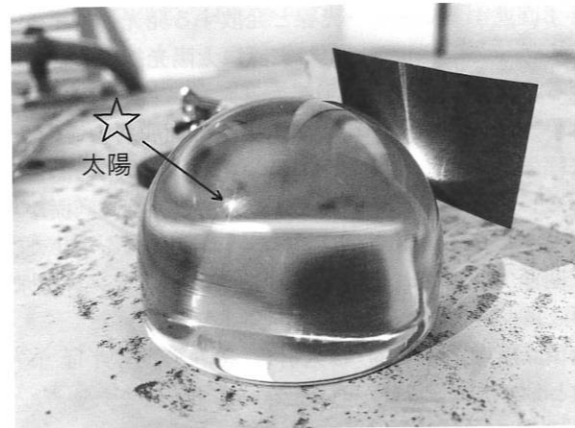


図9 黒色で印刷したA4のコピー用紙を、太陽光線に当たっているスタンプルーペの近くに置くと、煙が出てきた状態

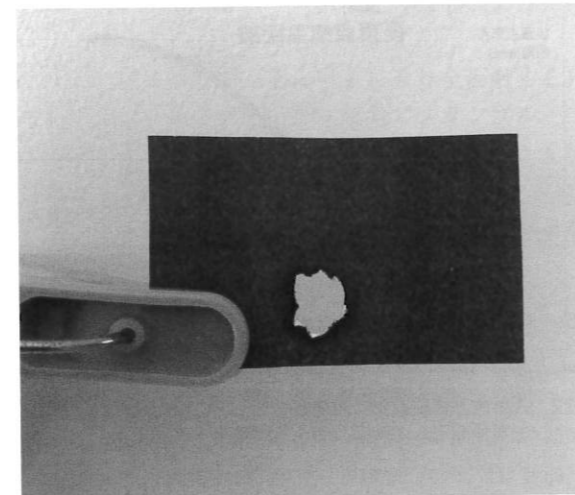


図11 穴が開いた黒色で印刷したA4のコピー用紙

ルーペのレンズ中心を通る法線に沿ってレーザー光線を入射させ、屈折も反射もない様子を観察した。写真のみであると白黒で光路が不鮮明なため、イラストによる図も併記した。

更に、曲率中心への入射角を変化させ、屈折と反射を観察した。図4、5では入射角20度、30度の光線はレンズ底面に屈折されて射出される様子が観察できた。

図6、7では入射角40度、50度の光線が全反射され、レンズ左上方に射出されるのが観察できた。

図8では発光ダイオードの発散光線を右上方から40度の入射角で入射すると、レンズの左側上方に集光している様子が観察できた。

図9では太陽光線が入射しているスタンプルーペに黒色で印刷したA4のコピー用紙を近接して置いたところ、すぐに煙が上がり始めている場面で、図10は無炎燃焼状態となった場面の写真である。図11は焼けて穴が開いた紙の写真である。実験場所は大阪市、日時は2017年10月10日13時で、天気は晴天、太陽高度は44.6度、入射角は45.4度、太陽方位は207度(南西方向)であった。後頂点焦点距離は計算によると6.1mmとなった。

考 按

スタンプルーペは様々な会社で製造され発売されていて、インターネットの通信販売で容易に購入することができる。拡大鏡としての目的だけでなく、重さがあることからペーパーウェイト(文鎮)としても知られていて、プレゼント用の商品としても人気がある。また、レンズを真ん中にして人が相対すると、それぞれの顔が映し出され、古い師が用いる水晶玉に似ていることもあって、一般人にとって興味深い製品でもある。

構造は過去の文献で明らかにされていて¹⁻³⁾、材質のみで拡大率は決定されるものであるが、その単純な構造に相反して、光の進み方は通常のレンズとはずいぶん異なるため、通常のレンズに対する注意書きだけでは足りないことが、本稿で求めた計算および実験結果から明らかとなった。底面による全反射を防止するためには反射防止コーティングなどの処理方法も考えられるが、商品の販売価格が廉価

であることから不可能であろう。

今までにスタンプルーペによる発火事故は報告されていないが、スタンプルーペが多くの人に使われるようになると、今後発火事故が生じることは容易に予想される。今後消費者や製造会社に対して啓発が必要であることが示唆される。

結 論

高屈折率スタンプルーペは全反射する臨界角が38.7度で、底面で全反射することがわかった。底面で全反射した光線はレンズ凸面の上方に焦点を結ぶため、太陽高度が51.3度までの太陽光がスタンプルーペに直接入射した場合、凸面側から射出した光線は集光し凸面に近いところに物体があると発火するおそれがある。太陽光が入射する窓際にスタンプルーペを置くことのないよう注意しなければならない。

Appendix

1. 底面で全反射する臨界角

θ_2 は入射角, θ_1 は屈折角, n_2 は高屈折率スタンプルーペの材質の屈折率, n_1 は空気の屈折率とする。屈折率 n_2 の媒質から屈折率 n_1 の媒質中に光が入射する場合、スネルの法則より

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}$$

全反射の場合 $\theta_1 = 90^\circ$ であるから、

$$\sin \theta_1 = \sin 90^\circ = 1$$

よって、

$$\frac{n_1}{n_2} = \sin \theta_2$$

$n_1 = 1.0, n_2 = 1.6$ であるから、

$$\frac{1.0}{1.6} \sin \theta_2 = 0.625$$

$$\therefore \theta_2 = 38.7^\circ$$

2. 面屈折力と後頂点焦点距離

1) 面屈折力

空気中からスタンプルーペの凸面に光線が入射するときの面屈折力

$$\frac{1.6-1.0}{x} = \frac{0.6}{x} \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

スタンプルーペから空気中の凹面に光線が入射するときの面屈折力

$$\frac{1.0-1.6}{-x} = \frac{0.6}{x} \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

2) 底面で全反射した光線の光路図(図1)をもとに後頂点焦点距離を求める

スタンプルーペの曲率中心(A)は底面から曲率半径(x)の1/3の高さに位置する。そこで、近軸光線で計算すると次のようになった。

DEに関して①より

$$DE = \frac{1.6}{\frac{0.6}{x}} = \frac{1.6x}{0.6} = \frac{8x}{3} \dots \dots \dots \textcircled{3}$$

ACに関して

$$\frac{AB}{AC} = \frac{x}{3} = \cos \theta_2$$

$$AC = \frac{x}{\cos \theta_2} = \frac{x}{3 \cos \theta_2} \dots \dots \dots \textcircled{4}$$

DCに関する式に④を代入すると

$$DC = DA + AC = x + \frac{x}{3 \cos \theta_2} \dots \dots \dots \textcircled{5}$$

CFに関する式に③と⑤を代入すると

$$\begin{aligned} CF = CE = DE - DC &= \frac{8x}{3} - \left(x + \frac{x}{3 \cos \theta_2}\right) \\ &= \frac{8x}{3} - x - \frac{x}{3 \cos \theta_2} = \frac{5x}{3} - \frac{x}{3 \cos \theta_2} \\ &= \frac{5x \cos \theta_2 - x}{3 \cos \theta_2} = \frac{x(5 \cos \theta_2 - 1)}{3 \cos \theta_2} \dots \dots \dots \textcircled{6} \end{aligned}$$

AFに関して、

$$AF = \frac{AI}{\cos \theta} \dots \dots \dots \textcircled{7}$$

ところで、

$$AI = AE \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2\right) = (DE - x) \sin \theta_2 \dots \dots \dots \textcircled{8}$$

⑦に⑧と③を代入すると、

$$\begin{aligned} AF &= \frac{(DE - x) \sin \theta_2}{\cos \theta} = \frac{\left(\frac{8x}{3} - x\right) \sin \theta_2}{\cos \theta} \\ &= \frac{5x \sin \theta_2}{3 \cos \theta} \dots \dots \dots \textcircled{9} \end{aligned}$$

FIに関して

$$FI = FH - IH = FH - \frac{x}{3} = \frac{3FH - x}{3} \dots \dots \dots \textcircled{10}$$

ところで、

$$\begin{aligned} FH = EH = CE \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2\right) &= CF \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2\right) \\ &= CF \cos \theta_2 \dots \dots \dots \textcircled{11} \end{aligned}$$

⑩に⑪を代入すると、

$$FI = \frac{3CF \cos \theta_2 - x}{3} \dots \dots \dots \textcircled{12}$$

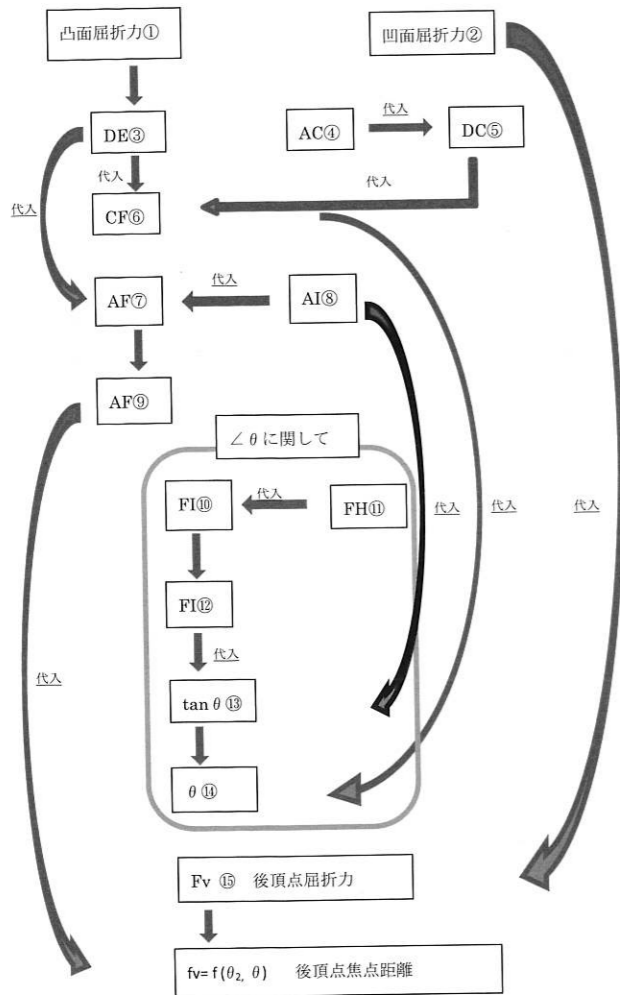


図12 光路図内の辺の名称と式番号で整理した、近軸光線で計算した場合のブロック図

曲率中心 A から曲面 G へ射出される光線の底面に対する角 θ に関して、

$$\tan \theta = \frac{FI}{AI} \dots \dots \dots \textcircled{13}$$

⑬に⑫と⑧を代入すると

$$\tan \theta = \frac{3CF \cos \theta_2 - x}{AI} = \frac{3CF \cos \theta_2 - x}{3AI}$$

$$= \frac{3CF \cos \theta_2 - x}{3(DE-x) \sin \theta_2}$$

上式を θ について変形し、⑥と③を代入すると

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \frac{3CF \cos \theta_2 - x}{3(DE-x) \sin \theta_2} \\ &= \tan^{-1} \frac{3x \cos \theta_2 (5 \cos \theta_2 - 1) - x}{3(DE-x) \sin \theta_2} \\ &= \tan^{-1} \frac{5x \cos \theta_2 - 2x}{5x \sin \theta_2} = \tan^{-1} \frac{5 \cos \theta_2 - 2}{5 \sin \theta_2} \dots \textcircled{14} \end{aligned}$$

よって、 θ は入射角 θ_2 によって決定される。
凸面より射出された光線の後側焦点は F' となり、後頂点屈折力 (Fv) は②より

$$F_v = \frac{1.6}{AF-x} + \frac{0.6}{x} = \frac{x + 0.6AF}{x(AF-x)} \dots \dots \textcircled{15}$$

よって、後頂点焦点距離 (f_v) は⑮式の逆数である。⑨を代入すると、後頂点焦点距離 (f_v) は入射角 (θ_2) と曲率半径 (x) を変数として求めることができ、次式であらわされる。

$$\begin{aligned} f_v &= \frac{x(AF-x)}{x+0.6AF} = \frac{x \left(\frac{5x \sin \theta_2}{3 \cos \theta} - x \right)}{x+0.6 \left(\frac{5x \sin \theta_2}{3 \cos \theta} \right)} \\ &= \frac{5x \sin \theta_2 - 3x \cos \theta}{3 \cos \theta + 3 \sin \theta_2} \end{aligned}$$

計算の流れを辺の名称と式の番号をもとにブロック図にすると図12のようになる。

利益相反公表基準に該当なし

文 献

- 1) 田邊正明, 辻 一央: スタンブルーベの倍率表示. 日本ロービジョン学会誌 8: 134-138, 2007.
- 2) Jackson AJ & Wolffsohn JS: Low Vision Manual. 218-221, Butterworth-Heinemann, London, 2007.
- 3) Roth G: Allgemeine Optik. 123-125, Herausgeber, Düsseldorf, 1988.
- 4) 田邊正明, 徳永達哉他: 高屈折率スタンブルーベ「みてみ」の開発. 視覚リハビリテーション研究 7: 24-26, 2017.
- 5) 東京連合防火協会 (編): 住宅火災・放火火災の実態 (平成16年中) その2 東京消防庁指導広報部生活安全課, 防災, 6-14, 東京, 2006.
- 6) 一般財団法人消防防災科学センター: 季刊 消防防災の科学 秋号, No.94, 2008.

(2017年8月17日受付)

発行所 日本眼科紀要会

567-0047 茨木市美穂ヶ丘 3-6 山本ビル 302 号室 ☎072-623-7878
