

基礎ロービジョン光学



-20D の視野拡大鏡 (Prof. George Woo 作成、Vision2014 Melbourne, Australia 会場にて)

日本ライトハウス
視覚障害リハビリテーションセンター
田邊 正明

URL: <https://lowvision.sakura.ne.jp/ex.html>

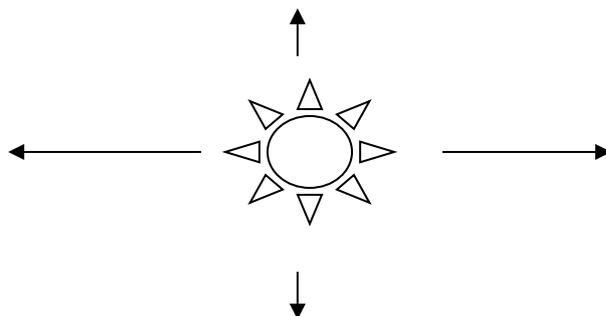
Low Vision Lab.

反射性：異なる媒質との境界面では、光線は反射の法則に従って、跳ね返るよう向きを変える。

屈折性：異なる媒質との境界面では、光線は屈折の法則に従って折れ曲がり向きを変える。

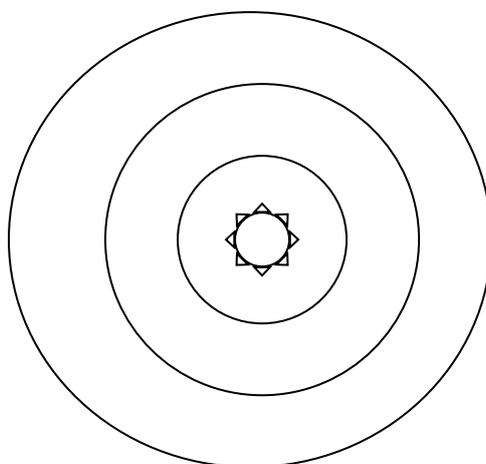
独立性：各光線は互いに独立なもので、干渉・回折のような相互に影響し合う現象を起こさない。

光線の基本性質に基づいて光の現象を理解しようとする学問：幾何光学



4. 光は波動

水面に生じる波と同じように光は「干渉」や「回折」と呼ばれる波動特有の現象を起こします。



視覚に関係した範囲では光を単に直線的に進む光線と見なして良いです。

(理由)

可視光線の波長はほぼ $400\text{nm} \sim 800\text{nm}$ ($0.0004 \sim 0.0008\text{mm}$)¹で、人間の目の構造のスケールに比べて極めて小さいため、「回折」のような波動現象はほとんど目立たないものになってしまうためです。

¹ nm(ナノメートル): 10^{-9}m

場合によっては光を波動と考えないといけないこともあります。

(理由)

有害な波長をカットする遮光眼鏡の利用があります。

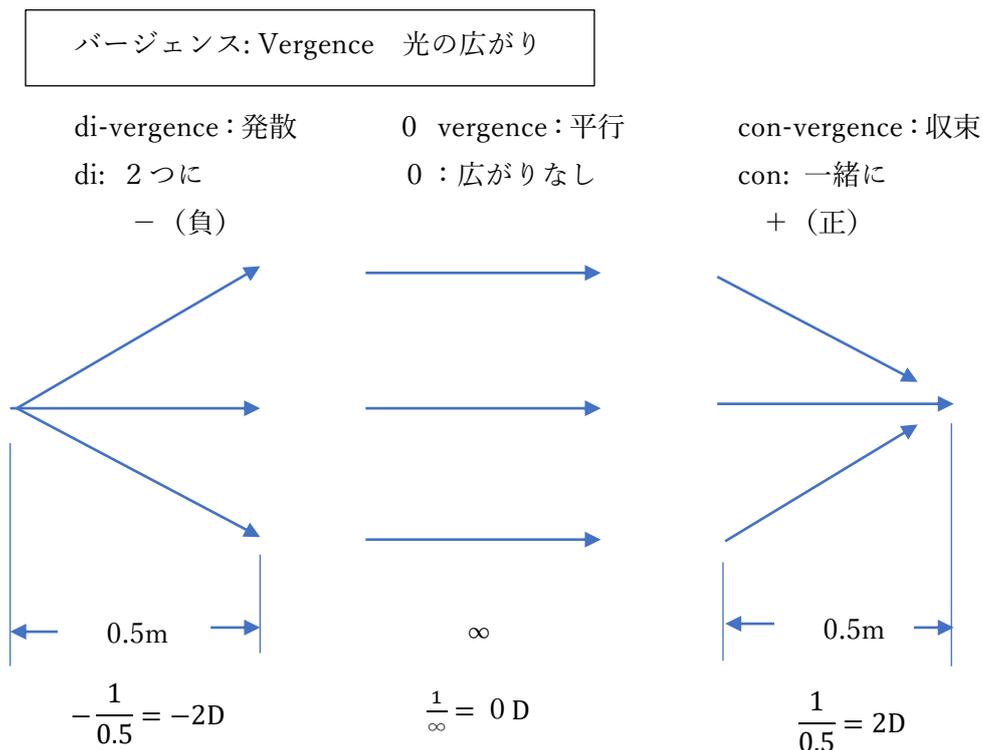
5. まとめ

- 1) 目は光の受信機です。
- 2) 目がキャッチする光は光線の集合とみなします。
- 3) 光線は単純な基本性質を持っています。
- 4) 光線は我々のスケールに合わせて単純化した「光の一つの姿」です。
- 5) 眼鏡でも場合によっては光を「波動」(光波)とみなす必要も出てきます。

II. Vergence (光の広がり) とレンズ

まず、vergence の基本式 (媒質は空気とします) を説明しましょう。

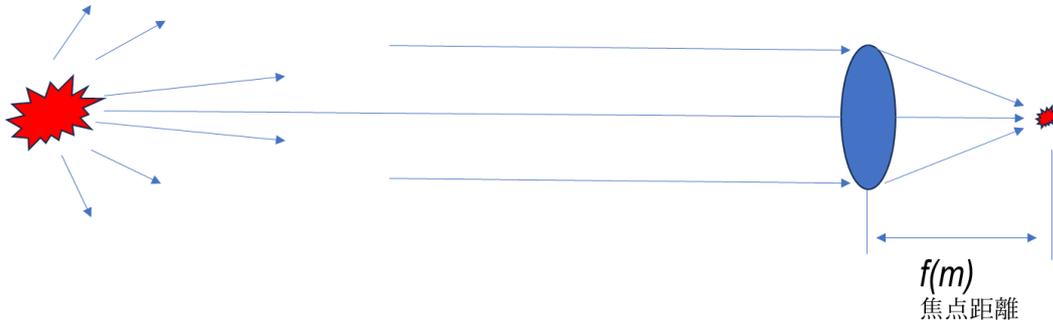
vergence とは光の広がり具合をいい、距離 (m) の逆数を使います。単位は D (ディオプトリ) です。



D (ディオプトリ) はレンズの屈折力の単位に使われます。

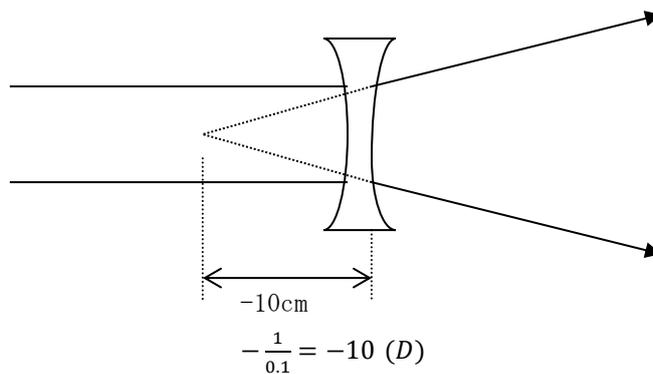
平行な光線 (太陽光線) がレンズを通過して集まる点を**焦点**といい、レンズから焦点までの距離を**焦点距離**といいます。凸レンズから出た光線の vergence は焦点距離 (m) の逆数で表され、その数値をレンズの**屈折力**といいます

$$\text{屈折力 (D)} = \frac{1}{\text{焦点距離 (f)}}$$



焦点距離 10cm の凸レンズの屈折力は $1/0.1 = +10D$

凹レンズの屈折力はどう表されるでしょうか？



凹レンズは光がレンズを通過後に出ていく道筋を左に伸ばしていき、光がそこからあたかも出てきたかのように見える点を焦点にしています。そして屈折力はその焦点からレンズまでの距離の逆数を用い、発散光線なのでマイナス符号を用います。

日本産業標準調査会：データベース-JIS 規格詳細画面

3.10 焦点特性

3.10.1
ディオプトリ、ディオプター (dioptr)
 焦点距離又は曲率半径をそれぞれメートルで表したときのレンズ (3.5.2) 若しくは表面、又は波面のバージェンスの焦点屈折力の単位

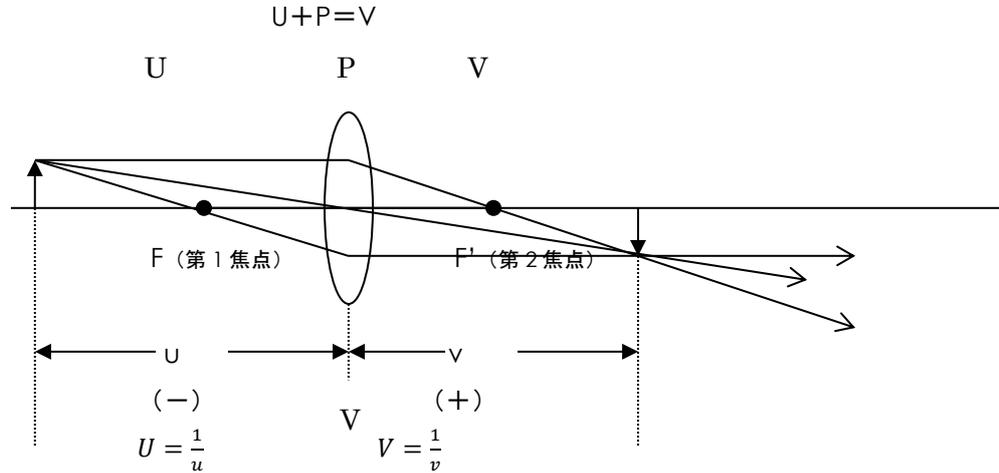
注釈 1 空气中で、レンズの屈折力は、焦点距離の逆数で与えられるが、バージェンスは、一般に屈折率 (3.1.5) を波面の曲率半径で割った値で与えられる。

注釈 2 一般にディオプトリの記号には、D 及び dpt. が用いられる。

注釈 3 デイオプトリは、メートルの逆数 (m^{-1}) で表される。

Vergence の基本式

光路図では光は左から右に進み、レンズの左側は-（マイナス）、右側は+（プラス）です。レンズと物体間距離を u (m) [$U(D)=1/u$]、レンズの屈折力を P 、レンズと像間距離を v (m) [$V(D)=1/v$]とすると次の関係があります。これを vergence の基本式といいます。



〔レンズを使った簡単な実験〕

焦点距離 10cm のレンズを使ってさまざまな像がどのようにできるか実験してみよう。

(実験 1)

物体がレンズの左 20cm の位置にあるとき、像はどこにできるでしょうか？

まず $U = -\frac{1}{0.2} = -5 (D)$

レンズの屈折力は $P = \frac{1}{0.1} = 10 (D)$

vergence の基本式に上の値を代入すると

$$-5+10=+5 (D)$$

つまり、 $V=5 (D)$

$$\frac{1}{v} = 5$$

$$v=0.2 (m)$$

よって、レンズの右 20cm のところに**実像**ができます。

vergence の基本式の図を見てください。レンズを通ったあとの像は上下反対になっているのがわかります。つまり、第 1 焦点 (F) よりも左側にある物体はレンズの右側で**倒立像**となってスクリーンに映るのです。これを**実像**といいます。

(実験 2)

物体がレンズの左 10cm の位置にあるとき、像はどこにできるでしょうか？

$$\text{まず } U = -\frac{1}{0.1} = -10 \text{ (D)}$$

vergence の基本式に上の値を代入すると

$$-10+10=0$$

つまり、 $V=0$ (D)

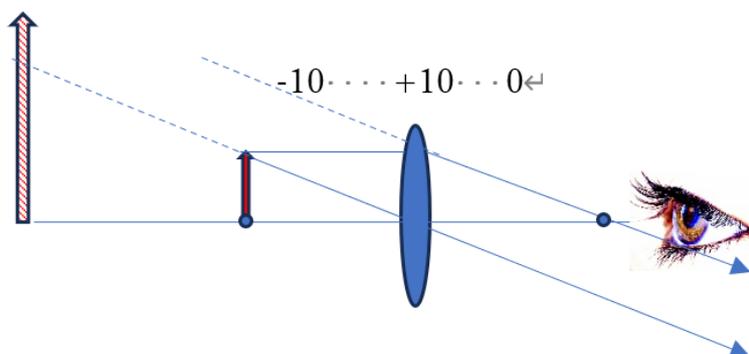
$$\frac{1}{v} = 0$$

$$v = \infty$$

よって、像はできません。

レンズから射出される光は平行光線となります。

これを図に書いてみましょう



(実験 3)

物体がレンズの左 5cm の位置にあるとき、像はどこにできるでしょうか？

$$\text{まず } U = -\frac{1}{0.05} = -20 \text{ (D)}$$

vergence の基本式に上の値を代入すると

$$-20+10=-10$$

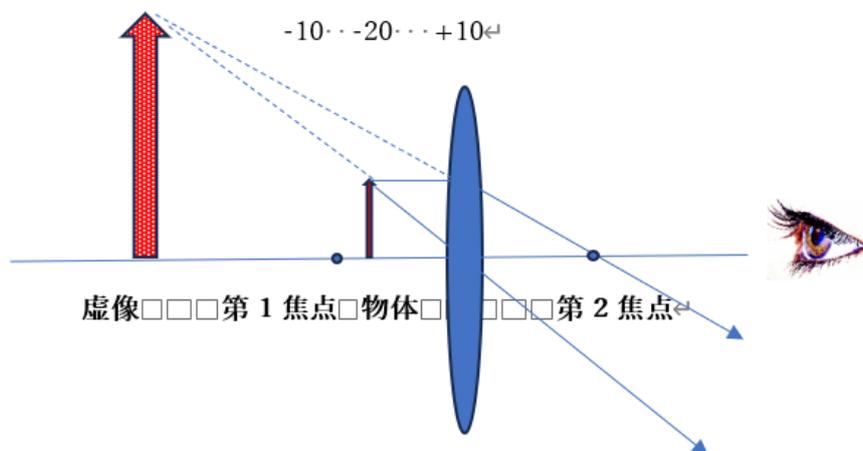
つまり、 $V=-10$ (D)

$$\frac{1}{v} = -10$$

$$v = -0.1$$

よって、レンズの左 10cm のところに虚像ができます。

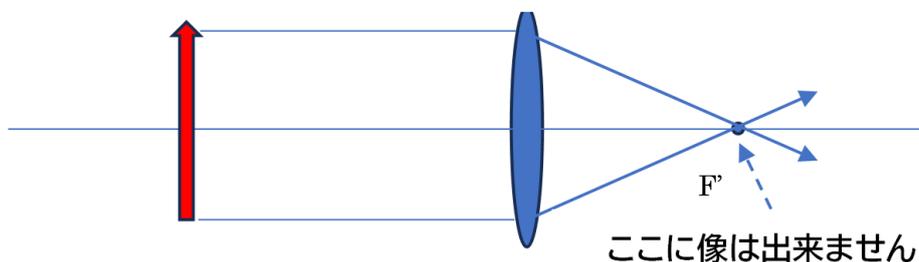
図を書いて確かめてみましょう。



像の方向は物体と同じで**正立像**ですが、像のできている場所はレンズの左側です。つまり、スクリーンには映らないのですが、レンズの右から覗くと実際の物体よりも大きな像を見ることができます。これを**虚像**といいます。

余談になりますが、

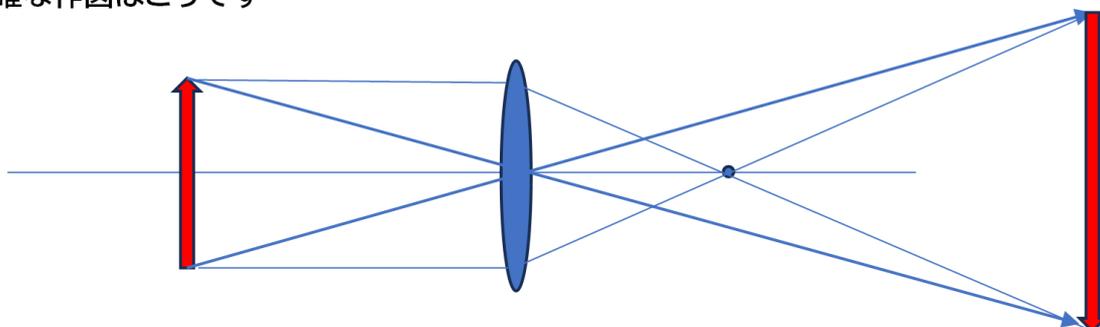
こういう図をみたことはありませんか？



この図はどこがおかしいのでしょうか？

結論は焦点 F' に像はできません。 F' は非常に遠いところにある 1 点から出た光がレンズを通った後に集まる点です。ですから、物体の上下から出るように書かれた光線はそれぞれ焦点 F' を通るものの、収束する点は別なので、もっと右に像を本当は結ぶはずです。

正確な作図はこうです



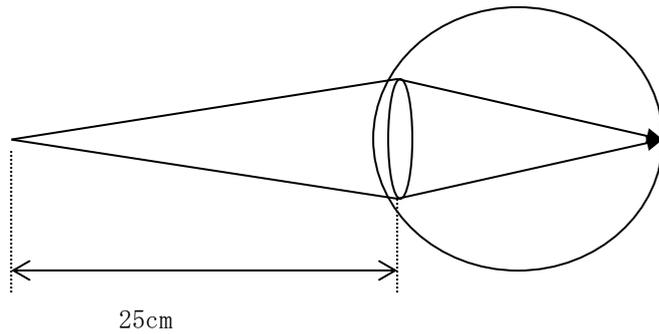
実習 1

近視の人だけが出来る実習です。眼鏡をとってみましょう。どこまで本を近づけたら字を読むことができますか？その距離を測ってください。

では、この人はどのような眼鏡をかけたら遠くがよく見えるのでしょうか？さきほど測った距離を使って眼鏡の度数を求めてください。

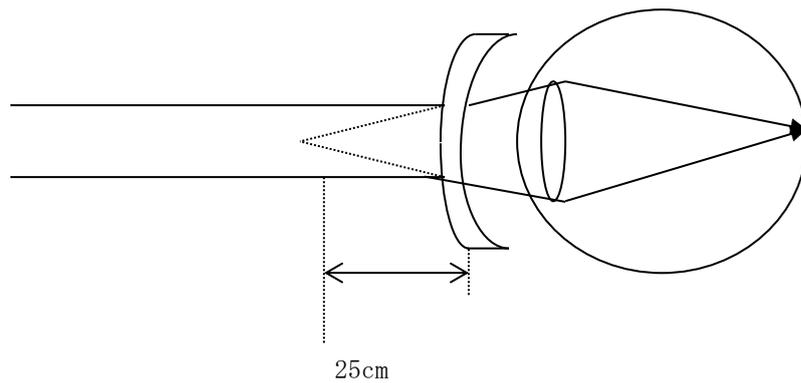
25cm の所で本を読めたとしましょう。

図にするとこのようになります。



この人が遠くのものを見るには、平行光線として目に入ってくる光が、あたかも 25cm のところからくる光であるかのようにごまかせばいいのです。つまり、眼の前に凹レンズを置きます。その凹レンズの屈折力は焦点距離 25cm となります。

図に書くと次のようになります。



凹レンズの度数は次のようにすれば求まります。

$$-\frac{1}{0.25} = -4 \text{ (D)}$$

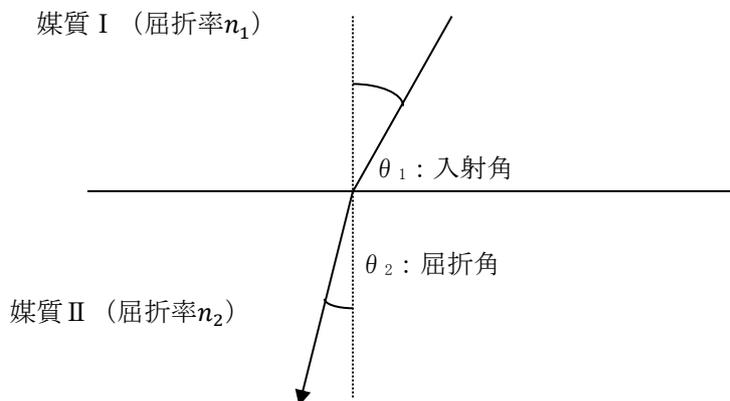
つまり、 -4D の凹レンズを使えば遠くが見えるのです。

Ⅲ. Vergence の基本式の求め方

では vergence の基本式はどのようにして作られているのでしょうか。

1. スネルの法則

まず、光の屈折の性質はスネルの法則で表されます。



入射光線が境界面に入ってくる向きを様々に変化させると、屈折光線もその向きをそれに応じて変化させますが、その変化は次の関係式を満たすものでなくてはなりません。

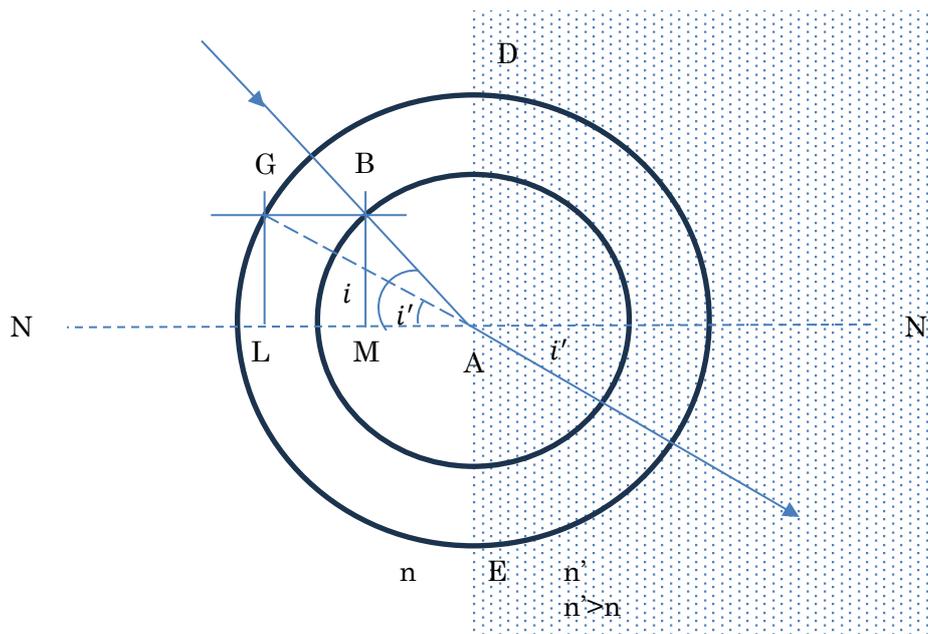
n_1 、 n_2 をそれぞれの媒質Ⅰ、媒質Ⅱの屈折率とすると

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{あるいは、} \quad n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

${}_1n_2 = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$ で定義される一定値 ${}_1n_2$ を媒質Ⅰに対する媒質Ⅱの屈折率といいます。真空に対

する媒質Ⅱの屈折率 n_2 をⅡの絶対屈折率、または単に屈折率といいます。

幾何学的に図示すると次のようになります。



境界面 DE の左側が屈折率 n , 右側が屈折率 n' の媒質とします。点 A を中心として $n:n' = AB:AG$ の比で円を描きます。光線 BA が境界面 DE に法線 NN' に対し入射角 i で入射するとします。点 B から法線 NN' に平行な線を引き、外側の円との交点 G を求めます。 GA が屈折角 i' の射出光線となります。

なぜかという、
三角関数の定義から

$$\frac{BM}{AB} = \sin i \quad \frac{GL}{AG} = \sin i'$$

ところで GB は法線 NN' に平行であるから $BM = GL$ となり、よって

$$AB \sin i = AG \sin i'$$

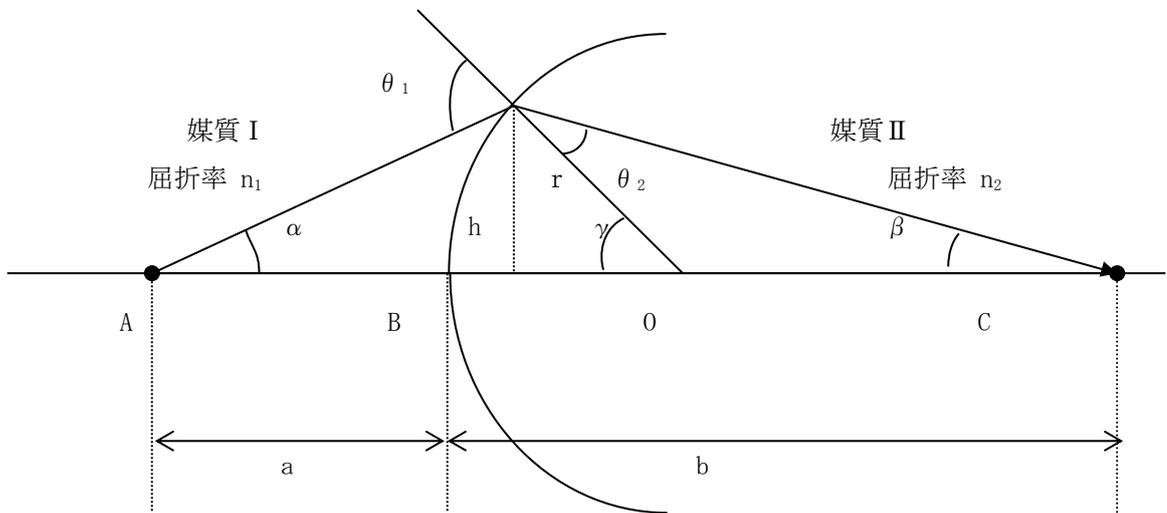
ここで、 AB と AG は半径であり、屈折率 n 、 n' と比例関係にあるから

$$n \sin i = n' \sin i'$$

2. 球面の結像公式（近軸光線の場合）

ここで、もっと一般的に球面に入る光はどのように像を結ぶのかを、光の屈折の法則であるスネルの法則から考えてみましょう。[注：長さは全て正の数（+）としています]

下の図のように媒質 I（屈折率 n_1 ）の中にある点光源 A から発する光が、半径 r の球面で接する媒質 II（屈折率 n_2 ）に入射したら、 C の位置にたどり着いたとします。そうすると、



スネルの法則より

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

$$\therefore n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2 \dots (1)$$

また、三角形の外角だから

$$\theta_1 = \alpha + \gamma \dots (2)$$

$$\theta_2 = \gamma - \beta \dots (3)$$

(2) (3) を(1)に代入すると

$$n_2(\gamma - \beta) = n_1(\alpha + \gamma) \cdots (4)$$

ところで、

$$\alpha = \tan \alpha = \frac{h}{a} \cdots (5)$$

$$\gamma = \tan \gamma = \frac{h}{r} \cdots (6)$$

$$\beta = \tan \beta = \frac{h}{b} \cdots (7)$$

(5) (6) (7) を(4)に代入すると

$$n_2 \left(\frac{h}{r} - \frac{h}{b} \right) = n_1 \left(\frac{h}{a} + \frac{h}{r} \right)$$

$$n_2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{b} \right) = n_1 \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{r} \right)$$

$$\frac{n_2}{r} - \frac{n_2}{b} = \frac{n_1}{a} + \frac{n_1}{r}$$

$$-\frac{n_1}{a} + \frac{n_2}{r} - \frac{n_1}{r} = \frac{n_2}{b}$$

$$-\frac{n_1}{a} + \frac{n_2 - n_1}{r} = \frac{n_2}{b}$$

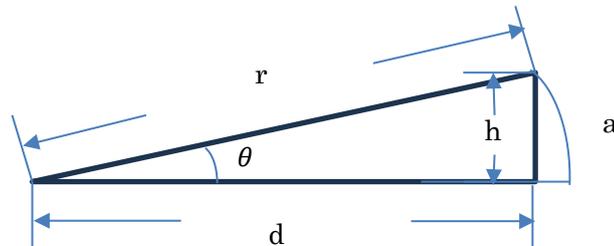
球面の結像公式の完成

ちょっと一息…

$\sin \theta_1 = \theta_1$ は どうして 成立するのでしょうか。

次の図のように微小な角 θ を考えてみましょう。弧度法の約束からすると次の式が成り立ちます。

$$\theta = \frac{a}{r}$$



一方、三角比の定義から

$$\sin \theta = \frac{h}{r}$$

ここで、 θ が十分微小だということから何がいえerでしょうか？

図から想像すると、 θ がどんどん小さくなっていると a と h が区別の付かないくらい接近して $a \cong h$ となってしまいます。このことから

$$\frac{h}{r} \cong \frac{a}{r}$$

となって

$\sin \theta_1 = \theta_1$ が成立することになります。

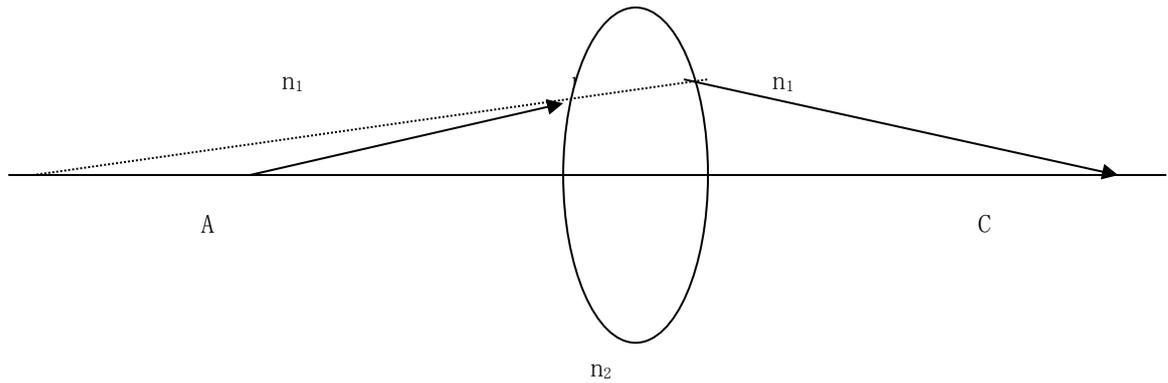
※ $\tan \theta$ についても同様です。

$$\tan \theta \cong \frac{h}{a} \cong \frac{h}{r} \cong \frac{a}{r} \cong \theta$$

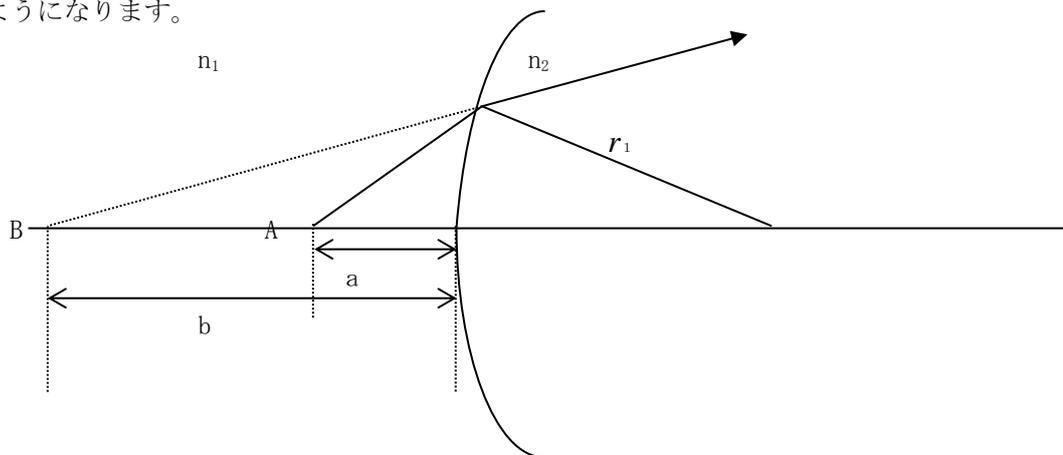
3. レンズの結像公式

では、今度はレンズで考えてみましょう。レンズは球面がお椀のように重なったものと考えればいいので、

1) 点 A から出た光がレンズを通過して点 C に結像する様子を図示すると

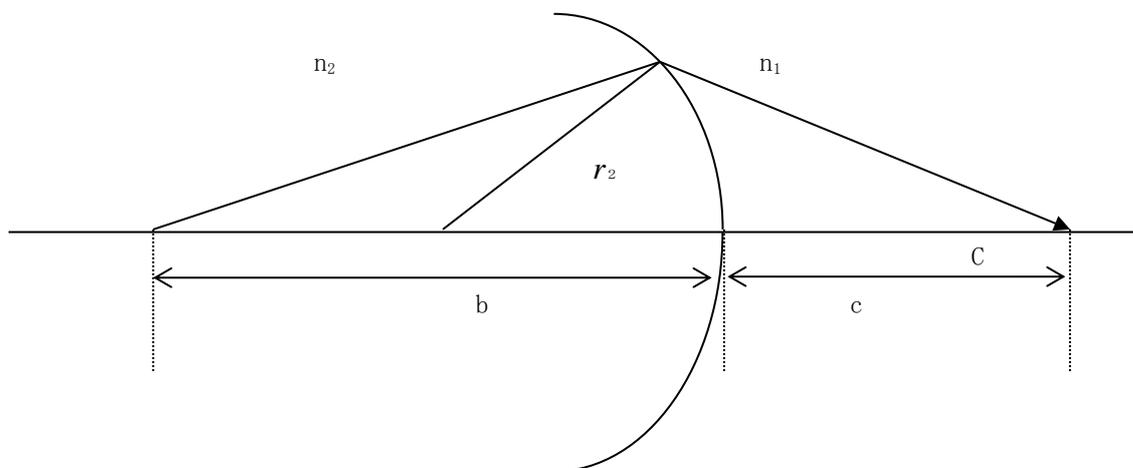


2) まず、レンズの前面での屈折を考えてみます。点 A から出た光はあたかも点 B から出てきた光のようになります。



$$-\frac{n_1}{a} + \frac{n_2 - n_1}{r_1} = -\frac{n_2}{b}$$

3) 次に、レンズ後面での屈折を前面で屈折された光で考えると



$$-\frac{n_2}{b} + \frac{n_1 - n_2}{-r_2} = \frac{n_1}{c}$$

4) そこで、前面と後面を合成すると

$$-\frac{n_1}{a} + \frac{n_2 - n_1}{r_1} + \frac{n_1 - n_2}{-r_2} = \frac{n_1}{c}$$

$$-\frac{n_1}{a} + \frac{n_2 - n_1}{r_1} + \frac{n_2 - n_1}{r_2} = \frac{n_1}{c}$$

$$-\frac{n_1}{a} + (n_2 - n_1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{n_1}{c}$$

となります。

ここで、 $-\frac{n_2}{b}$ 、 $\frac{n_1}{c}$ をそれぞれ、U、Vで表し、

$(n_2 - n_1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$ をPで表してみましょう。

そうすると(1)式は

$$U+P=V$$

と簡単に表され、これを **vergence の基本式**と呼んでいます。

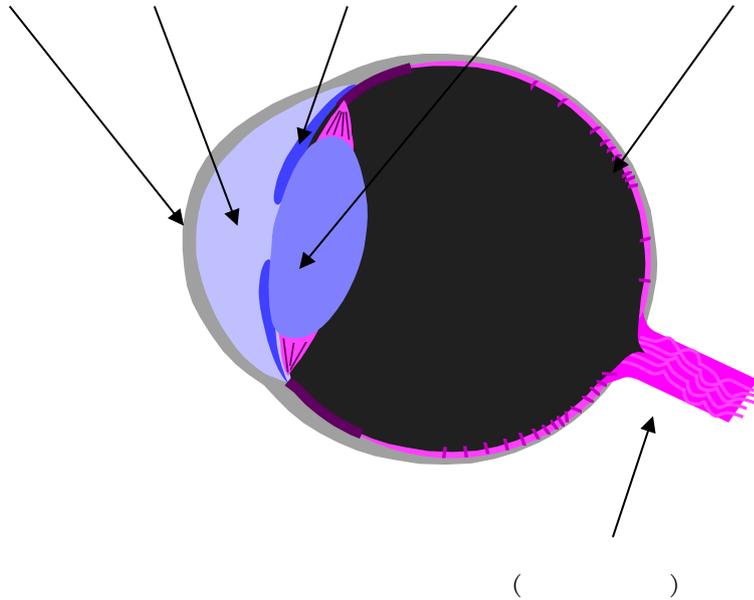
この式のなかのU、Vをそれぞれ物体と像のvergence、Pをレンズの屈折力といい、それぞれディオプトリ (D) という単位を使って表します。

物体と像のvergenceは n_1 を空気の屈折率として1(に近い)を代入すれば、それぞれレンズからの距離の逆数となります。

IV. 眼のしくみ

まず人間の眼はどのような構造になっているのか、ちょっと医学書の解剖図から調べてみましょう。次のかっこの中にみなさんが分かるところだけでいいですから、記入してみましょう。

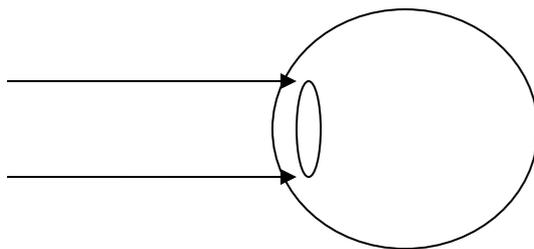
() () () () ()



V. 屈折異常

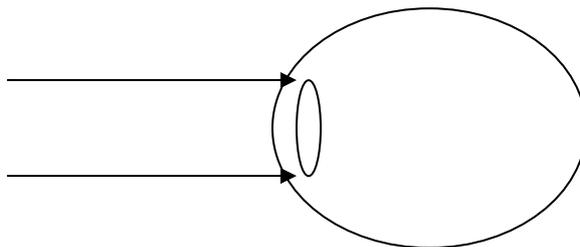
では、次に目の中に入ってくる光はどのように進んでいくのでしょうか。光の進み方を図に書いてみましょう。まずは、視力が正常な人の目です。光はとても遠いところから来るので、平行な2本の光線をたくさんの光の代表で書きます。

正視

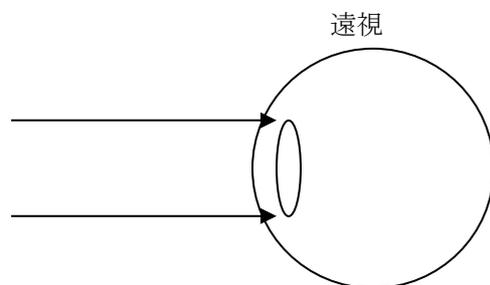


次に最近ではコンピュータの作業や、テレビを長時間見る人が増え、近視の人が多くなっていますが、近視の人の目の中では光はどのようなふうに進んでいくのでしょうか。

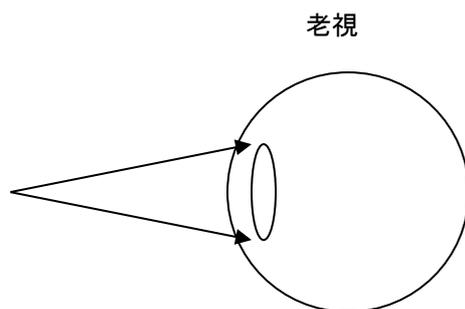
近視



今度は遠視の目です。時々小さい子供が凸レンズの眼鏡をかけていますね。それはどうしてなのでしょうかね。遠視眼のなかでの光の進み方も考えてみましょう。



最後に、40才を越える頃になると、近くが見えにくくなってきます。遠くの看板の時などはよく見えるほどに視力がよくても、新聞を見ようとするとき字がぼけて見えないという方はおられませんか？そうです。それが老眼です。では、新聞を読むときの光の進み方を老眼の目で考えてみましょう。



VI. 眼疾患

次に、目には光の進み方の問題だけでなく、目そのものに異常があることもあります。目の構造をカメラにたとえると、カメラのレンズが水晶体、フィルムが網膜ですが、フィルムの感度が落ちていたり、レンズに傷があるのと同じことが目にも起こるのです。

では、目の部位によって病名を分類してみましょう。知っている眼疾患名を下のかっこの中に書いてください。

- 角膜 : ()
水晶体 : ()
硝子体 : ()
網膜 : (), (), ()
視神経 : ()

VII. 視力、視野の異常

視力が低い状態を表すには、医学的な面からと、教育的な面からでは少し異なった見方があります。医学的という弱視とは次のような定義と考えてください。

医学的弱視：(amblyopia)

乳幼児の視力が発達していく過程において視力の発達がおさえられたため、良好な視力がでない状態。

つまり、訓練によって視力の向上が見込まれるということです。

一方、社会的な側面からいう弱視とは次のようになります。

社会的弱視 (partially sighted)

視覚障害はあるが、主に視覚による日常生活および社会生活が可能である状態。

社会的弱視の場合、視力だけでなく、いろいろな眼疾患により、視野の異常がある場合が多く、その見え方は様々です。

見え方によって大まかに分類すると次のようになります。

1. 求心性視野狭窄：周辺部が見えないため、針の穴から見るような感じ。

主な眼疾患：網膜色素変性症、緑内障



主な症状：視野が狭いため、階段からの転落、自転車との衝突などがみられる。

配慮：移動 ⇒ 白杖

文字 ⇒ 拡大は不要。羞明がある場合は白黒反転

2. 中心暗点：中心部分だけ5度～10度程度見えない。

主な眼疾患：黄斑部変性症、レーベル氏病



主な症状：小さな文字が読めないため、事務作業が困難。

配慮：移動 ⇒ 白杖はシンボルケーン

文字 ⇒ 拡大。羞明がある場合は白黒反転

Ⅷ. 文字の拡大

1. 拡大

- ・見えないものは大きくすれば見える

微生物・細菌・バクテリア：顕微鏡

星・惑星・衛星：天体望遠鏡

1) 拡大はロービジョン者に目標とする解像度を達成するために使われる

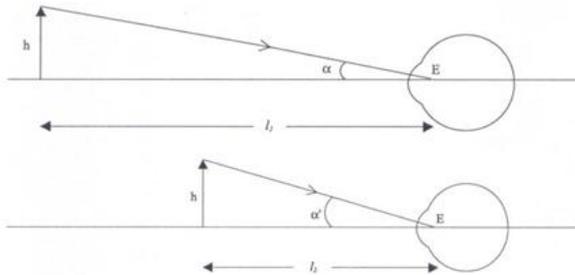
拡大効果の理解：目標とする解像度はプリントサイズや logMAR などで表される

2) 拡大鏡の処方

目標とする解像度を達成するためにどの光学的あるいはビデオシステムがベストか？

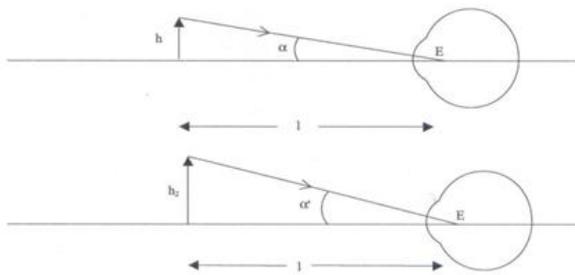
3) 拡大の形式

□ 相対的距離拡大法



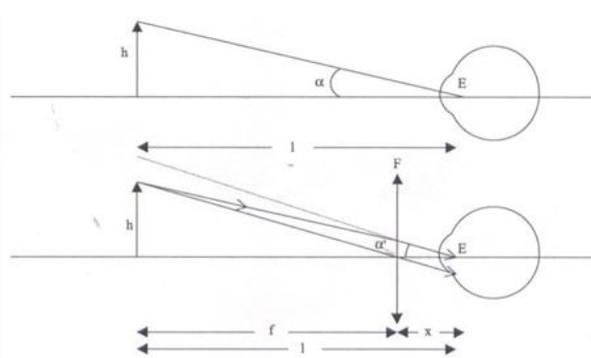
$$\text{相対的距離拡大} = \alpha' / \alpha \cong \tan \alpha' / \tan \alpha = l_1 / l_2$$

□ 相対的文字拡大法



$$\text{相対的文字拡大} = \alpha' / \alpha \cong \tan \alpha' / \tan \alpha = h_2 / h$$

□ 角度拡大法



$$\text{角度拡大} = \alpha' / \alpha$$

□ 投影拡大法

教育・社会弱視ではいくら屈折矯正しても視力は出ません。しかし、文字を大きくすることによって、感度の悪い目の状態を補い、本を読むことができたり、看板の文字が読めたりします。文字を大きくする方法は上図に示したようになり、具体的な方法は次のようになります。

相対的距離拡大法：目を物体に近づけ、網膜像を拡大する。

相対的文字拡大法：拡大コピー、拡大写本などで文字そのものを大きくする。

角度拡大法：単眼鏡（望遠鏡）を使う。

投影拡大法：ビデオカメラを利用し、画面に大きく映し出して見る。拡大読書器（CCTV*）の利用。

*CCTV:Closed Circuit Television

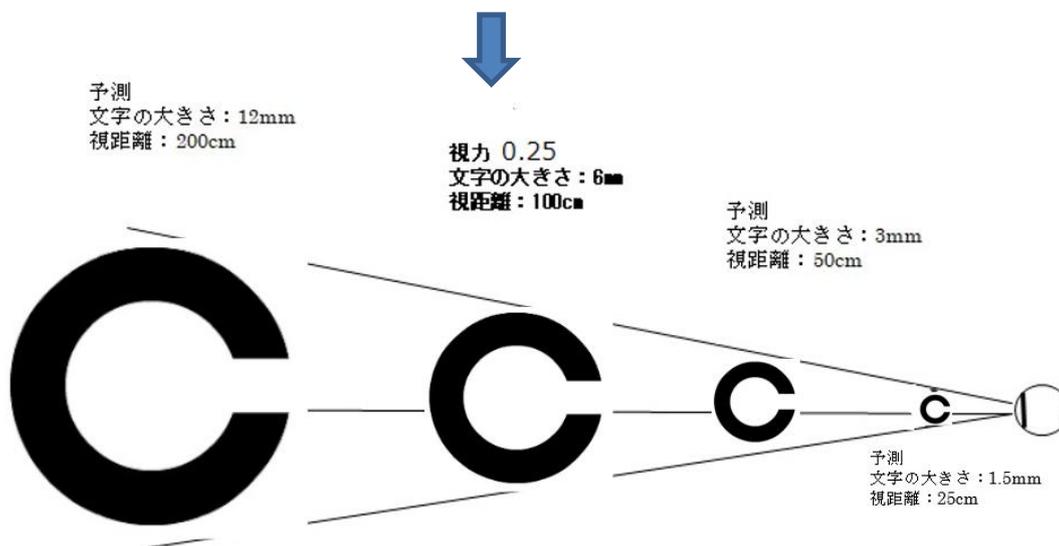
では、どの位文字を大きくすればいいのでしょうか。それは人によって異なりますから、拡大文字の印刷物を作成するのであれば、その人にあった視距離で読める行間、文字の大きさを選んで作成します。義務教育の教科書は現在では拡大教科書も作られており、副教材に関しては拡大写本ボランティアのグループが作成に当たっています。

2. どれくらいの屈折力が必要か

- 1) より強い拡大鏡がよいわけではない
- 2) 適切な視界、できるだけ広い視界を維持する拡大鏡を処方すべき
- 3) 解像度の変化の予測

視距離に比例する（網膜像が鮮明に映っていると仮定した場合）

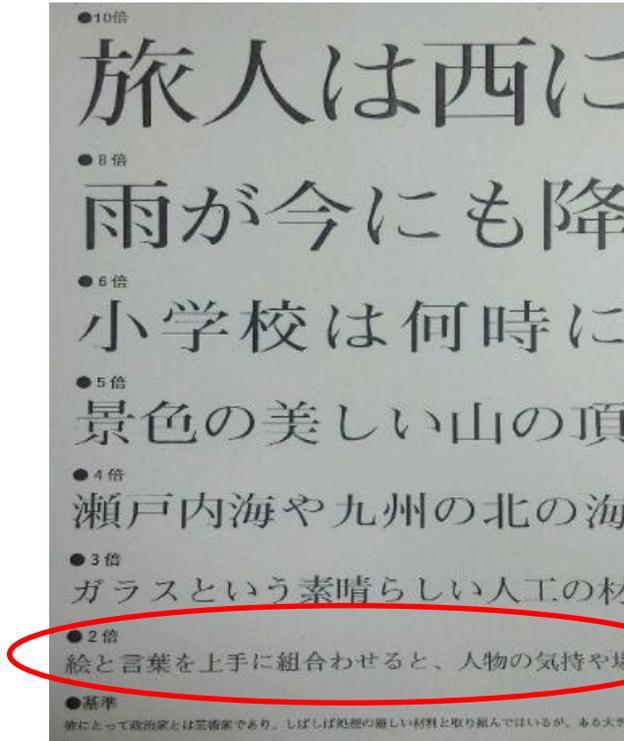
患者は 4.0M (6mm) のランドルト環を 100cm で見える 視力は 0.25



4) 倍率の算定のための読書チャート

- 新聞の文字を整数倍した読書チャート（国立障害者リハビリテーションセンター病院）
- MNREAD-J（東京女子大学小田浩一氏）

実習2：読書チャート（新聞の文字を基準）



眼と近見視力表の視距離(A)	20	cm
近見視力表で読めた一番小さな文字の倍率(B)	2	X
1xの文字を読むために必要な視距離(C): A/B	10	cm
必要な屈折力の計算(F): 100/C	10	D
倍率に換算:F/4	2.5	X

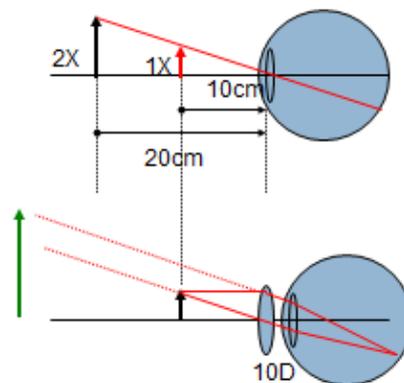


視距離：自由

20cm

5) 拡大鏡の倍率 -算定方法、正視眼の場合

新聞記事の文字の2倍の文字を20cmで読めた場合に、新聞記事を読むために必要なルーペの倍率。



2Xの文字を20cmで読める。
($1/0.2=5D$ の調節力)。

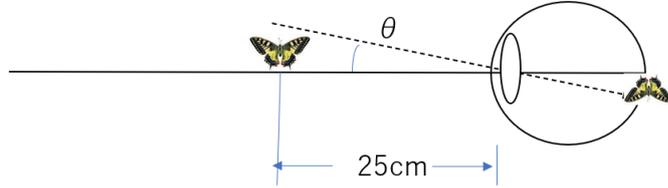
$20\text{cm}/2X=10\text{cm}$ に1Xの文字を持ってくれば網膜上には同じ大きさで結像し、見える。

$1/0.1=10D$ の補充(眼は無調節)。

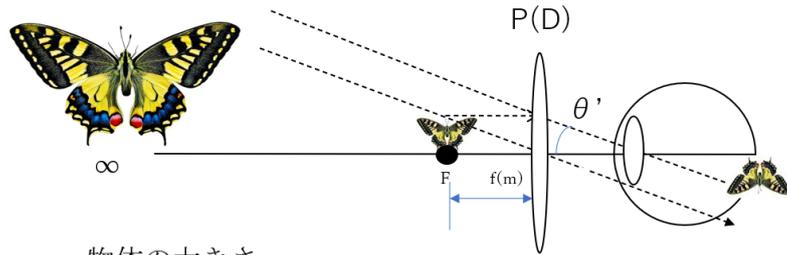
10Dのルーペは10cmにある1Xの文字の虚像を無限遠上に結像し、眼は20cmにあった2Xの文字と同じ大きさの像を無調節の状態で見ることができる。

1) 名目倍率（基準倍率） $P/4$

裸眼で視距離25cm、視角 θ で蝶を見た状態を基準にする。



凸レンズの焦点 (F) に蝶を置いて、無限遠上にできた虚像を視角 θ' で見る。



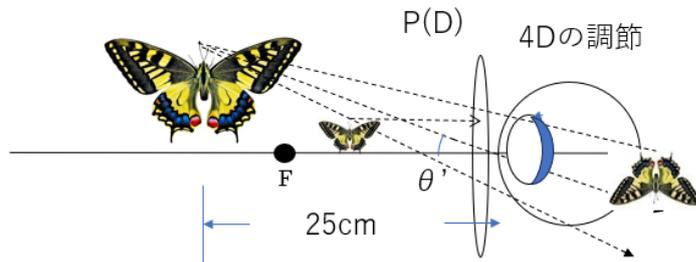
$$\text{倍率} = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\tan \theta'}{\tan \theta} = \frac{\frac{\text{物体の大きさ}}{f(m)}}{\frac{\text{物体の大きさ}}{0.25(m)}} = 0.25P = \frac{P}{4}$$

基準倍率といいます。

Nikonの拡大鏡は基準倍率です。eg. 20D/4=5x

2) 商用倍率 $P/4+1$

凸レンズの焦点 (F) よりレンズに近いところに蝶を置いて、眼から25cmのところになした虚像を視角 θ' で見る。



$$\text{倍率} = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{P+4}{4} = \frac{P}{4} + 1$$

眼の中に4 Dの拡大鏡がある状態になり、基準倍率に1を加えた数値になる。

Coil6xの拡大鏡は商用倍率 $20/4+1=6x$

2. 拡大の普遍的な表示

“拡大”には様々な定義がある

それは比較の用語である

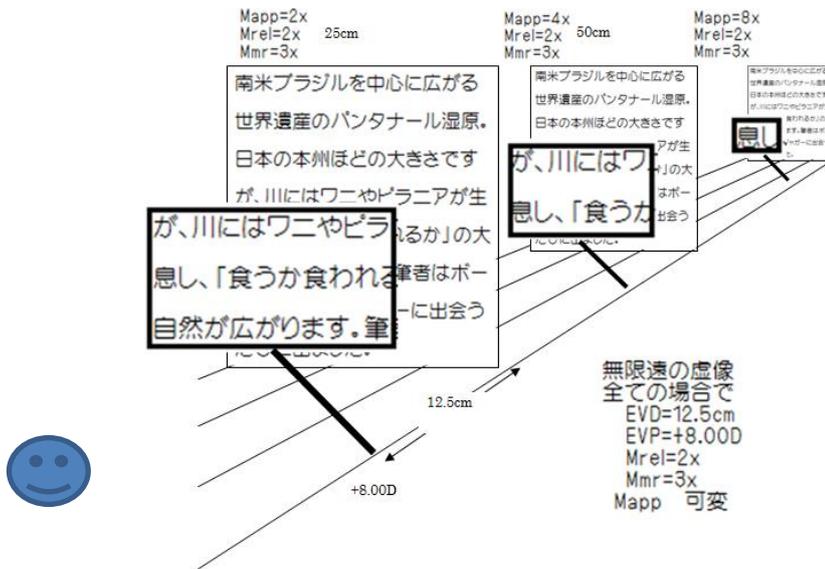
しかし、どの2つが比較されているかは分からない。

1) EVD (Equivalent Viewing Distance: 等価視距離)

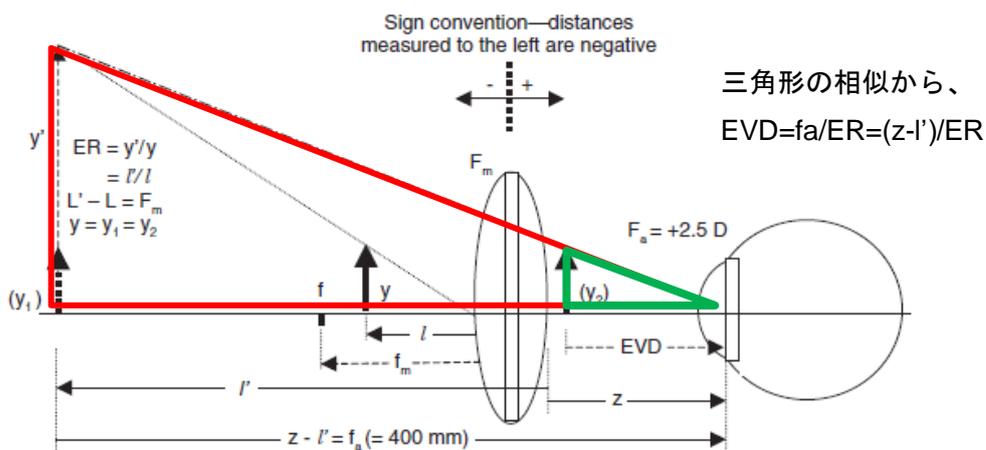
等価視距離: 像が向き合う角度と同じ角度に物体が向き合ったときの距離

① 虚像が無限遠で眼と拡大鏡の距離を変化させる場合

Mapp: 見かけの倍率、Mrel: 名目倍率、Mmr: 商用倍率



② 虚像が有限の場合

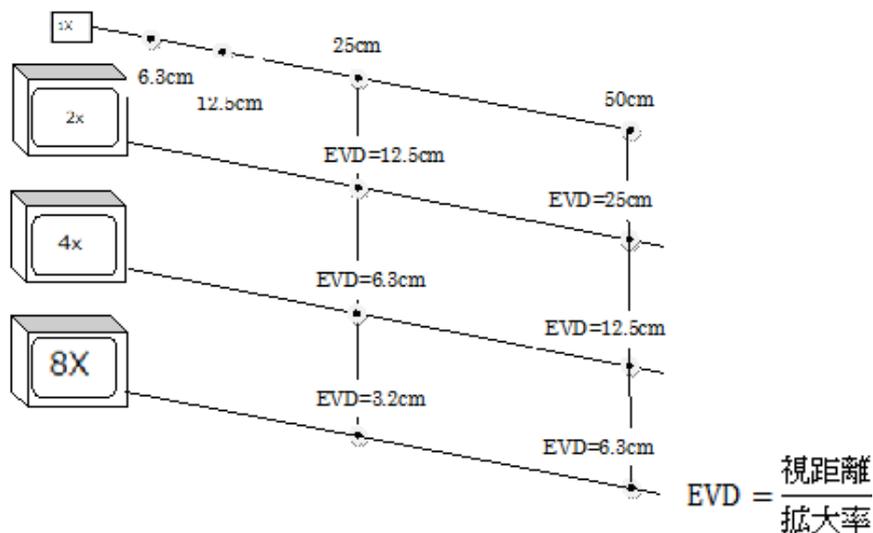


調節距離 (fa) = 1/Fa = z - l'

横倍率 (ER) : $ER = y' / y = l' / l = L / L'$ ($L = 1/l, L' = 1/l'$)

等価視距離 (EVD) は、拡大鏡によって拡大された像 (y') と同じ角度に向き合っていると仮定した物体 y (書面) が置かれている場所 (y₂ のところ) の距離である。

② 拡大読書器の場合



2) EVP (Equivalent Viewing Power: 等価視屈折力)

□ EVD の逆数

$$EVP = 1/EVD = ER/fa = F_m \cdot ER$$

横倍率と調節力の積となる

□ 拡大鏡と調節力の合成屈折力

$$F_e = F_m + F_a - zF_mF_a$$

F_e : EVP (等価視屈折力), F_m : 拡大鏡の屈折力, F_a : 調節力,

Ex. $F_m = +2, F_a = +4, z = 0.1 \Rightarrow +2 + 4 - 0.1 \times 2 \times 4 = 5.2$

$\Rightarrow 5.2 < +2 + 4 = 6$ 2枚のレンズを離すと屈折力が下がる

$F_m = +2, F_a = -1, z = 0.1 \Rightarrow +2 - 1 - 0.1 \times 2 \times (-1) = 1.2$

$\Rightarrow 1.2 > +2 - 1 = 1$ 2枚のレンズを離すと屈折力が上がる

+を♂、-を♀とすると、距離が離れるほど恋は燃えるということかな

恋愛方程式??

X. 単眼鏡

単眼鏡は無限遠上にある物体を大きくして見る補助具であり、天体望遠鏡や双眼鏡と同じ目的に使われています。対物レンズには平行光線が入射し、接眼レンズからも平行光線が射出するように設計されており、入射角と射出角の比が像の拡大率となります。また、単眼鏡の倍率は接眼レンズの屈折力を対物レンズの屈折力で割った数値になるのです。

無限遠の物体を大きくするレンズのシステムはケプラー式とガリレオ式があります。

1. ケプラー式単眼鏡

接眼レンズに入ってくる光の方向と対物レンズから出て行く光の方向が上下反対であることから、ケプラー式では見る物体は逆さに見えることになるのがお分かりになりますか？天体望遠鏡がこのケプラー式であることから、星は逆さに見えているのです。

ケプラー式

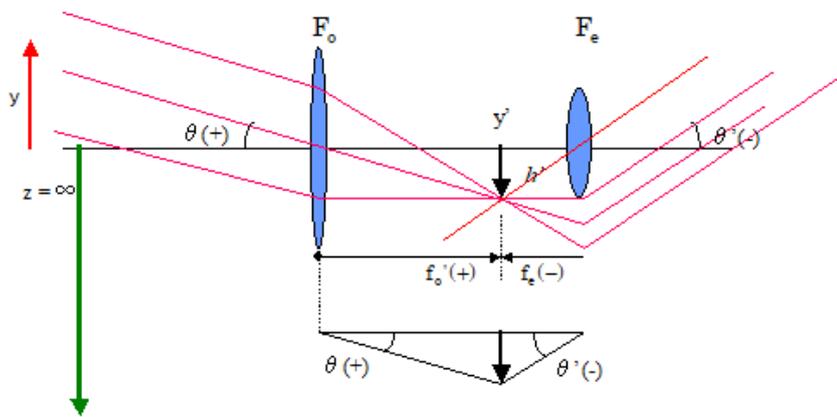


図5. F_o の第2焦点距離を f_o' (+), F_e の第1焦点距離を f_e (-)、角倍率を M_2 とすると

$$M_2 = \frac{\tan \theta'}{\tan \theta} = \frac{\frac{h'}{f_e}}{\frac{h}{f_o'}} = \frac{f_o'}{f_e} = \frac{f_o'}{-f_e}$$

$$F_o = \frac{1}{f_o'}, F_e = \frac{1}{f_e} \text{ とすると}$$

$$M_2 = -\frac{F_e}{F_o}$$

2. ガリレオ式単眼鏡

ガリレオ式では接眼レンズに凹レンズを用いることにより、像は正立像で見えるようになります。

ガリレオ式

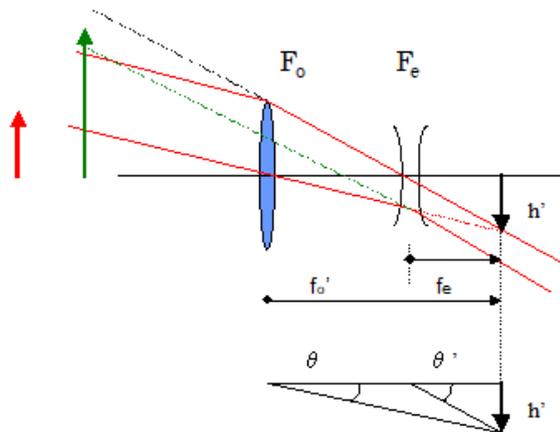


図2. F_o の第2焦点距離を f_o' (+), F_e の第1焦点距離を f_e (+)、角倍率を M_2 とすると

$$M_2 = \frac{\tan \theta'}{\tan \theta} = \frac{\frac{h'}{f_e}}{\frac{h}{f_o'}} = \frac{f_o'}{f_e} = \frac{f_o'}{-f_e}$$

$$F_o = \frac{1}{f_o'}, F_e = \frac{1}{f_e} \text{ とすると}$$

$$M_2 = -\frac{F_e}{F_o}$$

3. ケプラー式とガリレオ式の比較

種別	ケプラー式	ガリレオ式
対物レンズ	凸	凸
接眼レンズ	凸	凹
長所	高倍率、広視野、鮮明	コンパクト、軽い
短所	大きい、重い	低倍率、視野が狭い
像の方向	倒立像	正立像

4. 近用レンズ付き単眼鏡

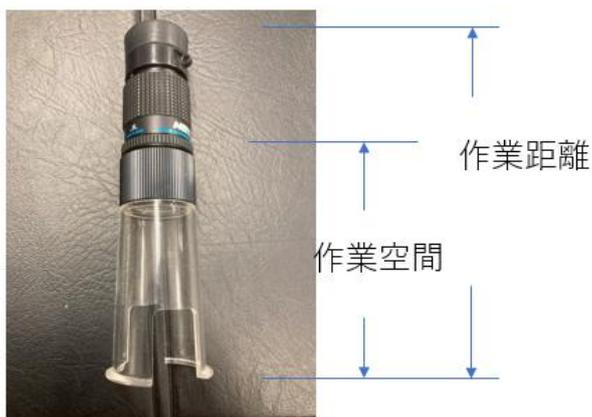
単眼鏡は遠くを見る補助具であり、焦点は無限遠にあります。

では、近くにある本を単眼鏡を使って読むにはどのようにすればよいのでしょうか？

ここで8倍の単眼鏡に12Dの凸レンズを付けてみましょう。そうすると、凸レンズから単眼鏡に射出する光は平行光線となり、単眼鏡はあたかも無限遠上にある本を見ているかようになります。つまり、このシステムでは83mmのところにある本を読むことができるのです。



12Dの凸レンズ



4倍の単眼鏡に装着

遠方視のとき角倍率4倍の単眼鏡が近見視では1枚の単レンズと等価になります。

$$\begin{aligned} \text{等価屈折力} &: 12\text{D} \times 4 = 48\text{D} \\ \text{倍率} &: 48/4 = 12 \text{ 倍} \\ \text{作業空間} &: 100/12 = 83\text{mm} \end{aligned}$$

近用レンズ付きの単眼鏡は作業距離をとれるが視野が狭くなり、読みづらいのが欠点です。

5. ナイツ単眼鏡ポケビュー PK-4 (Dタイプ) <https://lowvision.sakura.ne.jp/scale.html>

ナイツ単眼鏡ポケビュー PK-4(Dタイプ)は株式会社ナイツと日本ライトハウスが共同開発した単眼鏡(「単眼鏡用スケール」で特許取得済)で、鏡筒に対物レンズと物体間距離(作動距離、または作業空間)とともに等価屈折力が記載されています。それにより、ルーペの屈折力と比較することができ、作業空間の違いを調べられます。従来のPK-4は対物レンズと物体間距離のみの記載になっています。NEITZ PK-4(Dタイプ)はロービジョン者の拡大に必要な等価視屈折力(Equivalent Viewing Power: EVP) および卓上式拡大鏡のレンズと虚像間距離を求めることができます。



Fe(D)	作業空間(cm)
1	404.7
2	204.7
3	138.1
4	104.7
5	84.7
6	71.4
7	61.9
8	54.7
9	49.2
10	44.7
11	41.1
12	38.1
13	35.5
14	33.3
15	31.4
16	29.7
17	28.3
18	27.0
19	25.8
20	24.7
21	23.8
22	22.9
23	22.1
24	21.4
25	20.7
26	20.1

1) 等価視屈折力の測定法

- (1) 鏡筒を最大に伸ばし、EVP=26Dで視標から20cmの距離に近づく。
- (2) 視標が読めたら、少しずつ距離を伸ばし、EVP=20D,16D,12D,8Dと変化させ、鏡筒を縮めながら文字が読みにくくなる所で止め、EVPを決定する。
- (3) 目盛以外の値は付属の表1を参照して目測で読み取る。

目盛は印刷できる範囲の都合上20D(25cm)までですが、鏡筒を最長まで伸ばすと26D(20cm)まで計測ができます。鏡筒に記載されていない数値は上に掲載した表を参照して目視で求めます。

6. 単眼鏡の表示

単眼鏡には「8X20」のように表示がされていますが、最初の8は倍率を表し、次の20は対物レンズの口径を表しています。

XI. 屈折異常と単眼鏡

1) 近視のケース

単眼鏡の筒を短くする（遠くを見るときもそうします）

ガリレオ式…倍率は下がる

ケプラー式…倍率は上がる

2) 遠視のケース

単眼鏡の筒を長くする（近くを見るときもそうします）

ガリレオ式…倍率は上がる

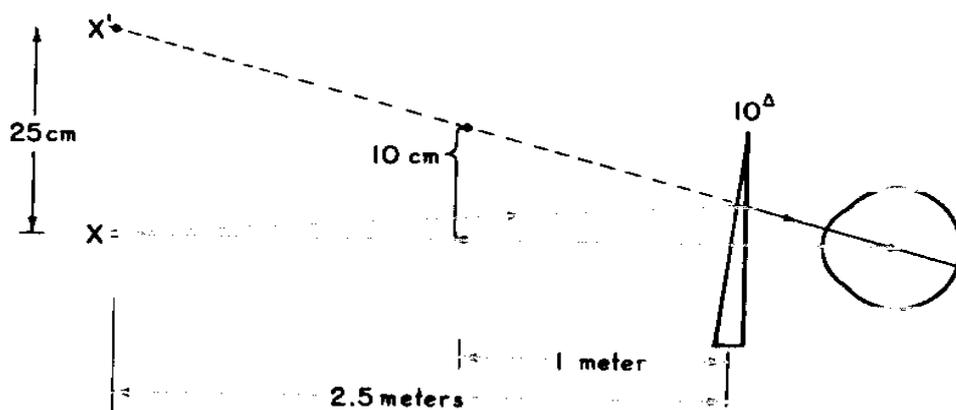
ケプラー式…倍率は下がる

（演習）対物レンズ+5D、接眼レンズ+30Dの単眼鏡を-20Dの眼鏡をかけて見ている人が、眼鏡をとったとき、何 cm 単眼鏡を縮めればいいでしょう。またそのときの倍率は？

XII. 眼科用プリズム²

1. プリズムの働き

眼科でプリズムを使用するにあたって、目は置き換えられた像を追うために（眼球回旋点を中心にして）回転しなければならないことを理解しなければなりません。この置き換えの方向はいつもプリズムの頂点の方ですが、プリズムの位置はそれらの基底の置き方によって典型的に規定されます（ちょっとあなたを混乱させます）！10 プリズムディオプトリで基底下方のプリズム

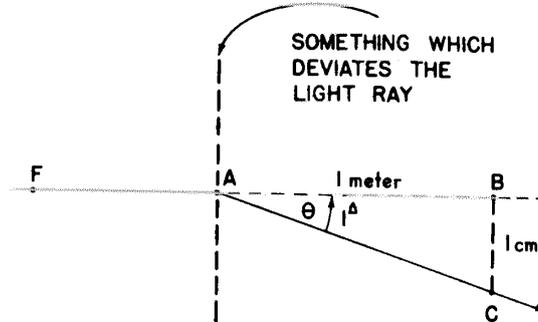


は上の方向へ像を置き換え、1メートルごとに10cm軸外方向に像を移動します（つまり、2.5メートル離れると25cm）。置き換えられた物体を固定するために目は上に回転しなければなりません。（図を見て下さい）

² Melvin L. Rubin: Optics for Clinicians, Triad Publishing Company, 1974.
臨床医のための光学

2. プリズムディオプトリの定義は次の通りです：

プリズムディオプトリ：1mの距離で1cmの明白な置き換えに対応する角度



光線 FA は（いくつかの光学的装置に出会ったあと）“まっすぐな”道筋から角度 θ で C に向かって向きがそらされます。三角形 ABC は直角三角形なので、 $\tan \theta = \frac{BC}{AB}$ 。

定義により、 $\theta = 1^\Delta$ （プリズムディオプトリ）の時

$$BC = 1\text{cm} \text{ と } AB = 1\text{m}$$

$$\text{ゆえに、} \tan \theta = \frac{0.01\text{ m}}{1\text{ m}} = 0.01$$

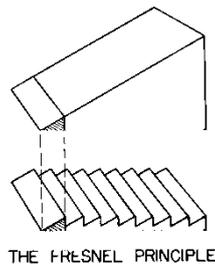
同じ理由で、もし θ が 5^Δ であれば $\tan \theta = 0.05$

今あなたは反対もまた真であることがわかるでしょう。つまり、どの角 θ でも $100 \tan \theta$ はプリズムディオプトリでの角度に等しいのです。

3. フレネル面の原理

どんなプリズムも全体の面においては同じ量のプリズム偏位が仮想的に生じます—それはプリズムの頂点、中間部分もしくは基底などのどんな部分を通して見ても変わりません。だから、プリズム頂点の小さなくさびのプリズムを含む、プリズム内のどの部分、もしくは細長い小片でも、光線の偏位に関してはその他のどんなところ（たとえば、より分厚い基底）ともまさに同じ効果を示します。

もしあなたが同じ力を持つ多くのプリズムからそれぞれの頂点を切り取り（ $\frac{1}{2}\text{mm}$ の幅の小片としましょう）、その小片をくっつけて集め、下図のように隣り合わせてそれらを置いたらどうなるでしょうか？



それであなたは固定された量のプリズム力をどんな光路にももたらす畝状の面を作れるでしょう—それは1つ1つ切り取られた頂点のくさびがもともとあった大きな1枚のプリズムとちょうど同じプリズム力です。そのような独特の構造で得られるものは重量と容積のとてつもない減少です。いくらか失われるものは小片によってもたらされた多くの畝による光学的な鮮明さです—けれども鮮明さの減少の量はどれだけ注意深く小片が構成されているかによります。

フレネル(Fresnel)はこの“細長い小片にする”原理を19世紀に発見しました。それで大きな直径の光学的屈折力を複製できるようになり、ゆえに重い灯台のレンズをもっと薄くして扱いやすくなりました。

彼のレンズ構造では小片は円になっていて、中心から離れるに従って同心円状に広がるそれぞれの“輪”のプリズム力は徐々に増加していきます。もちろん輪になった小片のプリズムの頂点が中心から外に向かっているならば面に広がるプリズム力の徐々の変化は光学的にプラスレンズを模倣しています—その反対はマイナスレンズと言えます。

今は、フレネルの原理はレンズ面の生産方法に改良を許すために現代の科学的技術と手を結んでいます。そのおかげでほとんど望みどおりの屈折力を持ち、適切で実用的な眼科用フレネルプリズム(またレンズも)が製造されます。軽量でとても良質な光学的特性を持ったフレネル面を実現するさまざまな薄く柔軟性のあるプラスチック板が現在では市販されていて入手可能です。これらの薄板は眼鏡の大きさに切り取られて、どんな普通の眼鏡レンズ面にも“押し付けて貼る”ことができます。それらは標準的な眼科用プリズムと分厚いレンズによって引き起こされる歪みがほとんどない適切な光学的効果を創造できますが、それはその歪みのほとんどは硝子の厚みが原因だからです。これらの後者の応用にはまだ完全に取って代わってはいませんが、“押し付けて貼る”のは患者、特に無水晶体患者や眼科用プリズムを必要とする患者に容易に受け入れられます。

XIII. 視覚障害者用補助具

視覚障害者用で文字を拡大するための補助具には拡大鏡や拡大読書器がありますが、拡大鏡は視覚障害者用としてだけでなく、布地の検査用や、宝石鑑定用のものを流用していることが多くあります。特に高倍率の拡大鏡となると、眼鏡店よりも模型・工作用品を扱っている東急ハンズなどで購入することができたりします。

では、こういった種類の補助具があるのでしょうか? 代表的な物を上げてみたいと思います。

1. 弱視眼鏡

ECHENBACH 弱視眼鏡セット

KEELER 弱視眼鏡セット

ZEISS 弱視眼鏡セット

2. 拡大鏡

1) 手持ち式拡大鏡

会社名	製品名	倍率	価格
Nikon	ポケットタイプ 拡大鏡	12D～20D	5,000～
SPIEGEL	ポケット	6X～9X	3,000～
WINNER	メタル小判型	5X～21X	4,000～
COIL	NEW HI-POWER HAND	3X～6X	15,000～

2) ライト付き手持ち式拡大鏡

会社名	製品名	倍率	価格
ESHENBACH	ワイドライトルーペ	3X～12.5X	16,000～
COIL	モバイルルーペ	3X～11X	12,000～

3) 卓上型拡大鏡

会社名	製品名	倍率	価格
COIL	スタンドルルーペ	3X～20X	12,000～
PEAK	Lupe 1961, 1962	10X, 15X	2,000～

4) ライト付き卓上型拡大鏡

会社名	製品名	倍率	価格
ESHENBACH	ライトルーペ	3X～12.5X	16,000～
PEAK	Lupe 1966, 2023	10X, 15X	7,000～

3. 単眼鏡

会社名	製品名	倍率	価格
NEITZ	ポケビュー	4X～8X	16,000～
Specwell	弱視用至近スコープ	2.75X～10X	15,000～
ZEISS	単眼鏡	4X～10X	50,000～
Nikon	モノキュラーII	6X	9,000～

4. 遮光眼鏡

HOYA RETINEX

東海光学 CCP CCG

5. 拡大読書器

XY テーブルを備えた据え置き型、電子ルーペなどのほとんどの機種は 198,000 円となっている。

XIV. 点字、福祉制度

拡大鏡での拡大倍率は15倍が通常限界です。それ以上になると拡大読書器を使い、20倍以上に拡大してやることによって、視力が0.01や、まれには手動弁や光覚弁であっても文字を読むことができる場合があります。また、拡大読書器の白黒反転機能を用いて差明を取り除くことにより、文字の使用が可能になる場合もあり、特に網膜色素変性症の方などはその代表的なケースといえると思います。

しかし、いくら補助具があっても、視力がとことん落ちてくればもう普通文字は使えません。そこで、普通文字と点字の境界視力をアンケート調査結果から見てみると0.01~0.02のところと考えるとよいようです。この視力になるとたとえ拡大読書器が使えたとしても、疲れが出てくるので、点字と併用する方が多くなります。

福祉制度

1) 助成制度

では、視覚障害者として認められるとどのような行政サービスが受けられるようになるのでしょうか。

(1) 日常生活用具

	対象となる等級	制限	助成額
拡大読書器：	1～6	学齢児以上で本装置により文字を読むことが可能になるもの	198,000

(2) 補装具

	助成額
弱視眼鏡：掛け眼鏡式	38,200
(高倍率(3倍以上)の主鏡を必要とする場合)	56,800)
焦点調節式	18,600
遮光眼鏡：前掛け式	22,400
屈折矯正が必要な場合	31,200
(円柱レンズ付加)	35,550)

2) 制度利用の手順

上に挙げた行政サービスを受けるためには役所でさまざまな手続きを経ねばなりません。その手続きに必要な時間は短いところで1,2週間、長いところでは2,3ヶ月もかかってしまいます。税金を使うのですから手続きに時間がかかるのは仕方がないかもしれませんが、あまりに長いと、実費で購入した方が安上がりになることもあります。では、その手続きの手順を書いてみましょう。

(1) 拡大読書器

① 業者から見積をとる

- ② 福祉事務所（市役所の健康福祉サービス課等）に助成の申請
(2) 弱視眼鏡、遮光眼鏡

- ① 助成を受けたい補助具を決めておく
- ② 福祉事務所に助成の申請、判定依頼書を受け取る
- ③ 更生相談所（あるいは指定の眼科）で判定を受け、福祉事務所に書類を持っていく
- ④ 福祉事務所から交付券を受け取る
- ⑤ 指定の業者で補助具を受け取る

おわりに

いかがでしたでしょうか。光学の基礎を学ぶことでロービジョン者の補助具の理解がいくらかでも容易になったのではないのでしょうか。基本的なことを押さえておくことで、補助具の紹介の場面での応用がきくと思います。そして、いろんな職種の人との協力を得てロービジョンの理解を深めていってください。

<引用、参考文献>

Mattingly WB: Advanced Low Vision Optics, *Journal of Ophthalmic Nursing & Technology*. 1994;13(4):161-168.

Melvin L. Rubin: Optics for Clinicians, *Triad Publishing Company*, 1974.

Melvin L. Rubin, 田邊正明訳：臨床医のための光学, TANABE, 2002.

Mike Freeman: Optics, *Butterworth-Heineman*, 2003.

植村恭夫他編：眼科検査のすすめ方, 医学書院, 1990.

牛尾健一：基礎光学. 日本眼鏡技術専門学校通信教育, 1997.

岸川利郎：光学入門, オプトロニクス社, 1997.

「光学のすすめ」編集委員会：光学のすすめ, オプトロニクス社, 1997.

西信元嗣：眼光学の基礎, 金原出版, 1990.

辻 一央：科学的な眼鏡調整, 眼鏡光学出版, 1996.

丸尾敏夫：エッセンシャル眼科学, 医歯薬出版, 1998.

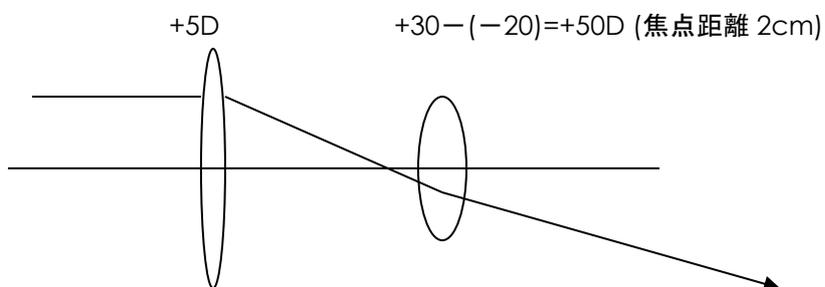
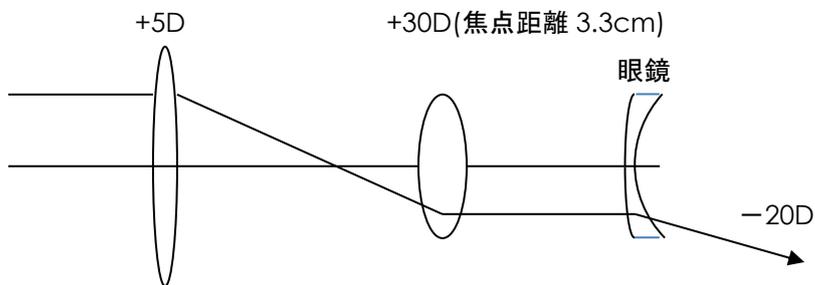
三宅和夫：幾何光学, 共立出版, 1997.

梁島謙次, 石田みさ子：ロービジョンケアマニュアル, 南江堂, 2000.

山田幸五郎：光学の知識, 東京電気大学出版局, 1996.

屈折異常と単眼鏡 (答え)

(演習)



筒は $(3.3 - 2)$ cm、つまり 1.2cm 縮めればいい。

倍率は $+50D / +5D$ 、つまり 10 倍になる。