

単眼鏡の等価屈折力と作業距離用スケールの作成

田邊 正明

日本ライトハウス養成部

魚里 博

北里大学医療衛生学部

日本ロービジョン学会誌

Journal of Japanese Society for Low-vision Research and Rehabilitation

単眼鏡の等価屈折力と作業距離用スケールの作成

田邊 正明

日本ライトハウス養成部

魚里 博

北里大学医療衛生学部

Calibration of Equivalent Viewing Power and Working Distances of Adjustable Focus Telescopes for Near Vision

Tadaaki Tanabe

Welfare Center for the Blind, Nippon Lighthouse

Hiroshi Uozato

Graduate School of Medical Science, Kitasato University

目的：単眼鏡では遠見視だけでなく鏡筒を伸ばせば近見視もできるが、表示倍率は遠見視の倍率だけである。そのため近見視用拡大鏡と比較できないので、近見視時における単眼鏡と拡大鏡の機能を屈折力および作業距離で比較できるようにする。

方法：鏡筒に記してある作業距離に合わせればピントが合う NEITZ の単眼鏡 PK シリーズを対象とした。屈折力、作業距離を比較するために等価屈折力、作業距離、鏡筒の長さの一般式を作成し、そのなかの定数となる対物レンズの屈折力は、近見視時の倍率を利用して求めた。

結果：作業距離、等価屈折力、鏡筒の長さの変化の関係をもとに、作業距離と等価屈折力を記したスケールを作成し鏡筒に取り付けた。これによって、検査者は、鏡筒の長さの変化による屈折力と作業距離の変化を観察できるようになった。

結論：等価屈折力と作業距離が記載されたスケールで、必要とされる等価屈折力、作業距離に適した鏡筒の長さに検査者が調節可能となり、適切な単眼鏡を容易に選択できるようになった。

(日本ロービジョン学会誌 10 : 57-62, 2010)

キーワード：スケール、等価屈折力、作業距離、単眼鏡

Purpose : Adjustable focus telescopes are not only for distance vision, but are also useful, when extended, for near vision. However, the magnification labeling provided on these telescopes is only for distance vision, so the telescope's magnification for near vision cannot be compared to magnification labels on near vision magnifiers. Thus, we investigated how to establish magnification in diopters at various working distances for both telescopes and magnifiers.

Methods : The telescopes we investigated were those in the PK series manufactured by NEITZ, which have working distances printed on the tubes, for easy focusing. To compare these telescopes to magnifiers, we developed a formula to calculate equivalent viewing power for various working distances and lengths of the tube. To use the formula, we calculated the power of the objective lens in diopters using the magnification for near vision.

Results : The equivalent viewing power was recorded at various distances along the tube, in diopters, with the related working distance. Thus, the user could see how, as the length of the tube changed, the power in diopters and the working distance also changed.

Conclusion : Calibrating adjustable focus telescopes with equivalent viewing power and working distance for each length of the telescope allows clinicians to easily select the proper telescope and to adjust its length according to the parameters needed by the individual patient.

(J Jpn Soc Low-vision Research and Rehabilitation 10 : 57-62, 2010)

Key Words : Calibration, Equivalent Viewing Power, Working Distance, Telescope

別刷請求先：538-0042 大阪市鶴見区今津中 2-4-37 日本ライトハウス養成部 田邊正明

Reprint requests to: Tadaaki Tanabe Welfare Center for the Blind, Nippon Lighthouse

2-4-37 Imazunaka, Tsurumi-ku, Osaka 538-0042, Japan

緒 言

ロービジョン者が使用する近見視用補助具には、凸レンズ1枚の拡大鏡と近方に焦点を合わせた望遠鏡とでもいうべき単眼鏡がある。単眼鏡は、障害者自立支援法に規定された補装具であり、焦点調節式弱視眼鏡として福祉の助成金を受けることができ、障害者の補助具としてはよく知られている道具の一つである。製造されている種類は2.8, 4, 6, 8, 10 倍の倍率が表示されたものが一般的であるが、どれがロービジョン者にとって適切であるかは、遠見視を中心に試用して決定しているのが実情である。しかし、普通の望遠鏡や双眼鏡との大きな違いは、筒が大きく伸びて近見視ができることである¹⁾。1枚レンズの拡大鏡と同じ等価屈折力で単眼鏡を使用すると、単レンズ(単眼鏡では対物レンズ)と物体間距離である作業距離は単眼鏡の方が拡大鏡よりも長くなることはKrefman²⁾により報告されており、単眼鏡は拡大鏡と虚像の大きさが同じであれば、より広い作業空間を確保できる便利なロービジョン用補助具である。また、鏡筒の長さの変化によって等価屈折力が変化するので見かけの大きさも変化させることができる³⁾。しかし、これらの特徴を生かした処方は臨床現場ではあまり行われていない。

本稿で用いる等価屈折力という用語は、複数のレンズから構成されるシステムや拡大読書器のような電子システムを使う場合に、そのシステム全体を1枚の薄いレンズのように取り扱うための数値を指している。更に複数のレンズシステムを考えると、ロービジョン者の屈折異常値や調節力も含めると、同じ等価屈折力のシステムであれば、ロービジョン者に自覚的に見える大きさは同じになる。そのためロービジョンの光学の領域では、倍率ではなく等価屈折力が拡大鏡や望遠鏡などの拡大補助具を選定・処方するときに重要な役割を果たすと考えられている⁴⁾。

そこで、近見視をしたときの単眼鏡を薄い1枚のレンズの屈折力であらわせるように、単眼鏡の鏡筒に等価屈折力と作業距離を表示するためのスケールを作成することを検討した。作成方法に関しては、ロービジョンケアの臨床現場で実際に使用している単眼鏡を使ってだけでも簡易かつ安価に作業でき、処方するために実用的に使用できるものが作成できる方法を考えた。

対象および方法

単眼鏡はCarton, NEITZ, Specwell, Zeissなど数社から販売されている。構造はケプラー式の望遠鏡であり、ペカンプリズムにより像を反転させて正立像を生じさせている。そのなかでNEITZの単眼鏡PKシリーズは、すでに鏡筒に近見視用を使用する作業距離(カタログでは作動距離となっ

ている)が記されていて(図1)、スケールが示す作業距離に合わせて鏡筒の長さを調節すればピントが合うように工夫されている。近見視時の倍率はカタログ(表1)には最短距離で使用したときの倍率が記されているが、簡易倍率か精密倍率⁵⁾のどちらの計算式をもとに算出されているのかが判断できないので、デジタルカメラ(FinePix F50fd Fujifilm)で拡大された虚像を撮影し、観察者が実際に感じる大きさを実測し、倍率を求め検証した。しかし、作業距離の変化に対応した倍率ではないので必要となる倍率、作業距離に鏡筒を調整できない。そこで倍率ではなく、ロービジョンの光学において、より普遍的な単位である等価屈折力で比較できるように、まず具体的な数値でケプラー式単眼鏡を近見視で使用した場合光路図ではどうなるかを検討し、様々な作業距離に対応した等価屈折力の一般式を作成した。更にそのなかの定数となる対物レンズの屈折力は近見視時の倍率を利用して求めた。

1. 等価屈折力と作業距離の実例

接眼レンズの屈折力、焦点距離をそれぞれ D_e , f_e , 対物レンズの屈折力、焦点距離をそれぞれ D_o , f_o , 等価屈折力を D_T , レンズ間距離を d とすると、等価屈折力は公式 $D_T = D_e + D_o - dD_eD_o$

であらわされる⁶⁾。ただし、これ以降公式で扱う距離の単位はm(メートル)とした。数値の例は単眼鏡を近見視で使用するための $f_e + f_o < d$ を条件として、図2に示したように2倍の単眼鏡を簡便のために接眼レンズを+20D, 対物レンズを+10D, レンズ間距離を175mmとして等価屈折力を求めると、

$$D_T = 10 + 20 - 0.175 \times 10 \times 20 = -5$$

となる。接眼レンズに平行光線を入射すると、接眼レンズ

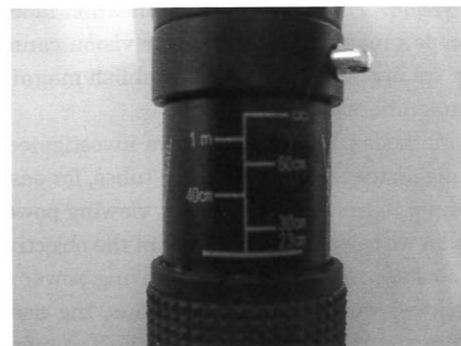


図1 NIETZ PK-6 近見視時の作業距離のスケール

表1 NEITZのカタログ

	PK-3S	PK-4S	PK-4	PK-6
倍率(無限遠)	2.8倍	4.2倍	4倍	6倍
倍率(最短距離)	3.6倍	5.3倍	5.5倍	7.6倍
最短作動距離	15cm	20cm	20cm	23cm

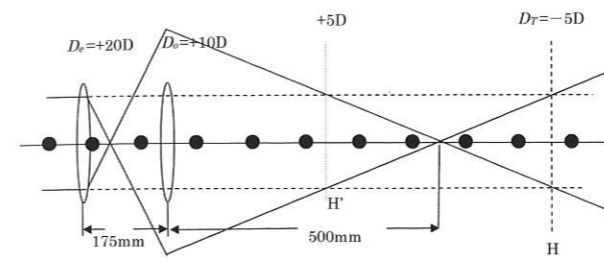


図2 平行光線が接眼レンズに入射したときの結像関係
 D_e : 接眼レンズの屈折力, D_o : 対物レンズの屈折力, D_T : 等価屈折力, H: 主面, H': ペカンプリズムを組み込んだときの主面

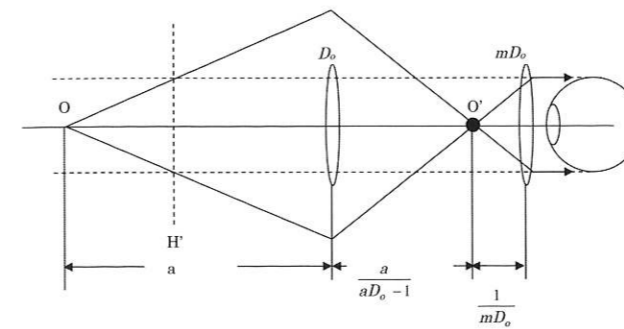


図4 単眼鏡を使用した近見視の一般化
 a : 作業距離, D_o : 対物レンズの屈折力, m : 表示倍率
O: 物体, O': 接眼レンズの前焦点, H': ペカンプリズムを組み込んだときの主面

と対物レンズ2枚を1枚の薄いレンズと考えた場合、主面Hがそのレンズの位置となり、-5Dの発散光線が観察される。一方、対物レンズから500mmの位置では実像が観察され、無限遠の物体の正立の実像を映すことになる。しかし、実際にはケプラー式単眼鏡ではペカンプリズムが組み込まれているので、像を反転し倒立の実像が映し出される。ケプラー式単眼鏡全体のシステムを1枚の薄いレンズとすると、その位置するところは仮想的な主面H'となり、+5Dの収束光線を生じることになる。

次に、この光路図を左右反対にして、+10Dの対物レンズから500mmの距離にある物体から射出される発散光線を軸外光線であらわすと、+20Dの接眼レンズからは平行光線が射出され、無限遠上にある拡大された虚像を生じる(図3)。ここで仮想的な主面H'に存在すると仮定した+5Dのプラスレンズの焦点距離上に置いた物体を見たとき、観察される正立像の視角を θ とすると、接眼レンズで観察される虚像の視角は $-\theta$ となり、+5Dのレンズで見ると同じ大きさで倒立像が観察される。しかしケプラー式単眼鏡の場合、実際にはペカンプリズムにより像が反転するので正立像が観察されることになる。

2. 作業距離、鏡筒の長さの変化、等価屈折力の関係

図4を参照してケプラー式単眼鏡の近見視を一般化した。単眼鏡の表示倍率を m 倍とすると $D_e = mD_o$ である。図4

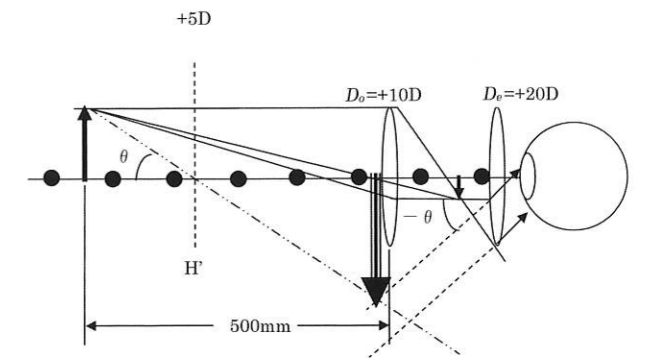


図3 単眼鏡による近見視の光路図

では距離の符号はすべて正とした。

対物レンズから物体までの作業距離 a は次の式であらわされる。

$$a = \frac{m}{D_T} + \frac{1}{D_o} \dots\dots\dots (1)$$

鏡筒の長さの変化 Δt は次の式であらわされる。

$$\Delta t = \frac{D_T}{mD_o^2} \dots\dots\dots (2)$$

(1)(2)式の導出方法の詳細は補遺1に示した。

3. 対物レンズの屈折力

(1)(2)式を利用すれば対物レンズの屈折力、対物レンズと接眼レンズの等価屈折力、遠見視のための表示倍率から作業距離と鏡筒の長さの変化が求められるが、対物レンズの屈折力はカタログに記載されていない。更に着脱できないためにレンズメータでも計測できない。そこで、単眼鏡を作業距離 a で使ったときの近見視の倍率を m_n , 絶えず変化する眼と物体間距離を b_v , 表示倍率を m とすると、対物レンズの屈折力は次の式であらわされる。

$$D_o = \frac{m_n}{am_n - b_v m} \dots\dots\dots (3)$$

(3)式の導出方法は補遺2に示した。

結 果

最短の作業距離は、鏡筒を最大に伸ばしたときに単眼鏡を物体に徐々に近づけて正視眼で虚像がクリアに見えるはじめたときの距離とし、理論的な考察では調節はしないと考えた。最短作業距離での近見視における倍率は単眼鏡なしで物体を見た大きさと、単眼鏡を通して見た虚像の大きさを比較すればよいので、PK-3S, PK-4S, PK-4, PK-6についてそれぞれ眼に代わるものとしてデジタルカメラを使用し、オートフォーカスで撮影して求めた。そして(3)式に代入し、対物レンズの屈折力を算出した。結果はPK-6を例にとると次のようになった。

PK-6の最短の作業距離は240mmで、そのときの眼と物

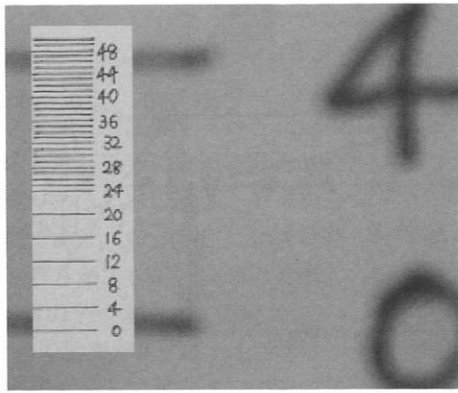


図5 PK-6を通して作業距離240mmで見た状態(外側の写真)と、単眼鏡なしで裸眼に模したデジタルカメラと物体間距離328mmで見た状態(内側の写真)を比較すると、単眼鏡なしで見た4mm幅の線間距離が単眼鏡を通して44mmに拡大されているので、11倍に拡大されている(スケールの単位はmm)。

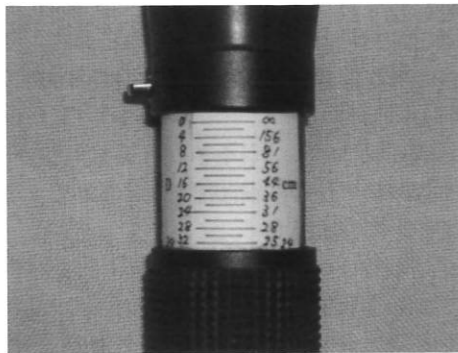


図6 スケールを貼り付けたPK-6
左側：等価屈折力、右側：作業距離

体間距離は328mmであった。単眼鏡で見たときの写真と単眼鏡なしで見たときの写真を比較すると、4mmの線間距離が44mmに拡大されているので近見視における倍率 m_n は11倍であった(図5)。そこで $a=0.24$, $b_v=0.328$, $m=6$, $m_n=11$ を(3)式に代入し、対物レンズの屈折力を求めると16.37Dとなった。同様にしてPK-3S, PK-4S, PK-4の対物レンズの屈折力を計算すると、それぞれ28.41D, 22.62D, 21.34Dであった。

PK-6の単眼鏡の最短の作業距離から無限遠までの範囲で(1)(2)式を使って等価屈折力、作業距離、スケールの長さの関係を示すと表2のようになった。

この表をもとにスケールを作成し、単眼鏡の鏡筒を最大限に伸ばした状態で最短の作業距離を対物レンズ側に鏡筒に貼り付けた(図6)。また、PK-3S, PK-4S, PK-4に関しても同様のスケールを作成した。

考 察

単眼鏡はPK-6を例にとると、鏡筒の長さを調節するこ

表2 PK-6の等価屈折力、作業距離、スケールの長さの関係

Fe (D)	作業距離 (mm)	スケールの長さ (mm)
0	∞	0.0
2	3,060	1.2
4	1,560	2.5
6	1,060	3.7
8	810	5.0
10	660	6.2
12	560	7.5
14	490	8.7
16	440	10.0
18	390	11.2
20	360	12.4
22	330	13.7
24	310	14.9
26	290	16.2
28	280	17.4
30	260	18.7
32	250	19.9
34	240	21.1

とにより、等価屈折力が0~34Dまで連続的に変化する単レンズ拡大鏡と同等になることがわかった。

作業距離は、等価屈折力16Dを例にとると、(1)式よりPK-3Sは210mm, PK-4Sは310mm, PK-4は300mm, PK-6は440mmであり、また16Dの単レンズ拡大鏡の場合、作業距離は屈折力の逆数で求められるので62mmであった。つまり、同じ屈折力であれば、拡大鏡よりも単眼鏡の作業距離は長く、更に表示倍率が高い単眼鏡ほど作業距離がより長くなるので、ユーザーに必要な作業距離に合った補助具を提供できると考えられた。

必要とされる近見視用補助具の選択は、まず読書チャートでロービジョン者に必要とされる equivalent viewing distance (以下 EVD) を求め、その逆数である equivalent viewing power (以下 EVP) のディオプトリ値を得られる補助具を選べばよい⁷⁾。しかし、作業距離によって選ぶべき単眼鏡は異なるので、それぞれの単眼鏡に貼り付けたスケールの等価屈折力を先に求めた EVP の値に合わせ、そのときに示された作業距離を比較すれば目標とする数値に近いものを選ぶことが可能となった。例えば、新聞の記事を読みたい人が記事の2倍の大きさの文字を200mmの視距離で読む場合、 $200/2=100$ mmのEVD、つまり $1000/100=10$ DのEVPが必要である。作業距離を400mmにしたいときには、検査者がそれぞれの単眼鏡のスケールを10Dに合わせると作業距離がPK-3Sは320mm, PK-4Sは460mm, PK-4は450mm, PK-6は660mmと示され、PK-4が一番近い数値であることが容易にわかる。あとは単眼鏡の重さ、大きさ、視野も選択の重要なポイントであり、メガネフレームにマウントできるかどうか検討すればよい。

対物レンズの屈折力を求めるために、本稿ではデジタルカメラで単眼鏡を通して撮影した像と単眼鏡なしで撮影した像を比較し、求めた倍率を利用した。最初はカタログに記載された近見視時の倍率を使用することを考えたのであるが、遠見視の倍率は日本工業規格(JIS)⁸⁾で規定されているのに対し、カタログに記載されている近見視の倍率は、根拠が明確でなかったため実測して確認した。近見視の倍率計算には簡易倍率と精密倍率があるので、デジタルカメラで撮影した像から求めた倍率と比較した結果、カタログの数値は簡易倍率に近い数値であると推測された。臨床現場で簡易にできる対物レンズの計算方法にはほかにReich³⁾の

$$\text{公式 } D_o = \frac{D_v}{2} \pm \sqrt{\frac{D_v^2}{4} + \frac{D_v}{\Delta t}} \text{ を用いる方法もある}$$

(D_o : 対物レンズの屈折力, D_v : 対物レンズと物体間距離の逆数, Δt : 無限遠から最短距離での近見視に変化させたときの鏡筒の長さの変化)。しかし、これらの方法は対物レンズの屈折力がわからない場合に臨床現場で簡便にできる方法であって、対物レンズの屈折力を間接的に求めており、誤差を伴うことは否めない。等価屈折力の精度をあげるためには、今後メーカーから対物レンズの屈折力が開示されることが望ましい。

Brownら⁶⁾の報告にもあるように、ロービジョン用補助具の倍率、屈折力の表示はメーカーによって統一性がなく、補助具を選定するにはその補助具の特性を十分知る必要がある。今回作成したスケールの屈折力は、矯正眼鏡レンズで用いるような精度を保障するものではないが、ロービジョン者に必要な拡大、作業距離を有する補助具を選ぶ目安としては実用的であると考えられる。

しかし、作業距離の問題が解決しても実際に選択されるためには焦点深度、視野、操作性などの課題が残されている。Smith⁹⁾は10Dの調節力で2倍の近見視用単眼鏡を使用したときの焦点深度は205mmであるが、6倍になるとわずか25mmになると報告している。Fonda¹⁰⁾は単眼鏡より単レンズのプラスレンズを選んだ39例の報告をしており、SloanとJablonski¹¹⁾は単レンズの作業距離より少なくとも50%長くならなければ近見視用単眼鏡の利用は保障されないとしている。また、Krefman²⁾は単眼鏡の不利な点は視野の狭さ、価格の高さ、見栄えの悪さであるとしている。このように近見視用単眼鏡の使用には課題も多いが、焦点深度が浅い点は単眼鏡の位置を固定して見る、また視野の狭い点は単眼鏡をスキャンして全体を順序よく見るようにする訓練を行えば十分利用できるようになることを考えると、臨床現場で拡大鏡と同じように紹介し、ユーザーが選択できる補助具の幅を広げていく必要があると思われる。

補遺1. 等価屈折力に対応した作業距離、鏡筒の長さの変化を求める一般式の導出(図4参照)

対物レンズから物体O'までを作業距離 a とすると、対物レンズからその結像点O'までの距離は

$$\frac{1}{-\frac{1}{a} + D_o} = \frac{a}{aD_o - 1}$$

接眼レンズの焦点距離は

$$f_e = \frac{1}{mD_o}$$

対物レンズと接眼レンズの間の距離は

$$d = \frac{a}{aD_o - 1} + \frac{1}{mD_o} \dots\dots\dots (1)$$

つまり、接眼レンズと対物レンズの等価屈折力は

$$D_r = D_o + mD_o - mD_o^2 \left(\frac{a}{aD_o - 1} + \frac{1}{mD_o} \right) \\ = -\frac{mD_o}{aD_o - 1}$$

しかし、ケプラー式単眼鏡はペカンプリズムが組み込まれていて、像が反転し倒立像が正立像になるので、正負の符号を逆にすると

$$D_r = \frac{mD_o}{aD_o - 1} \dots\dots\dots (2)$$

a について整理しなおすと

$$a = \frac{m}{D_r} + \frac{1}{D_o} \dots\dots\dots (3)$$

(1)に(3)を代入すると

$$d = \frac{D_r}{mD_o^2} + \frac{m+1}{mD_o}$$

つまり、鏡筒の長さの変化を Δt とすると

$$\Delta t = \frac{D_r}{mD_o^2} \dots\dots\dots (4)$$

となり、等価屈折力に対応した作業距離、鏡筒の長さの変化を求める一般式(3)(4)が導出された。

補遺2. 対物レンズの屈折力の導出

単レンズ拡大鏡の倍率 m_{rel} は b を明視距離、 D_r を等価屈折力とすると、公式 $m_{rel}=bD_r$ で求められる^{12,13)}。明視距離で標準とされるのは一般的には250mmとされるので $b=0.25=\frac{1}{4}$ となり、等価屈折力 D_r の拡大鏡の倍率は $\frac{D_r}{4}$ であらわされる。しかし、単眼鏡で使われる近見視の倍率 m_n は明視距離を絶えず変化する眼と物体間距離 b_v とするので⁵⁾、次のようになる。

$$m_n = b_v D_r \dots\dots\dots (5)$$

よって、

$$D_r = \frac{m_n}{b_v} \dots\dots\dots (6)$$

また、(3)式を D_o について整理すると

$$D_o = \frac{D_r}{aD_r - m} \dots\dots\dots (7)$$

(7)に(6)を代入すると

$$D_o = \frac{m_n}{am_n - bvm} \dots\dots\dots (8)$$

となる。

文 献

- 1) Bailey IL : Principle of near vision telescope. Optom Monthly 32-34, 1981.
- 2) Krefman RA : Working distance comparison of plus lenses and reading telescopes. Am J Optom Physiol Optics 57 : 835-838, 1980.
- 3) Reich LN : Adjustable focus telescopes for near vision. Optom Vis Sci 68 : 183-188, 1991.
- 4) Jackson AJ, Wolffsohn JS et al : Low Vision Manual. Elsevier, Philadelphia, 183-197, 2007.
- 5) 築島謙次, 石田みさ子 : ロービジョンケアマニュアル. 南江堂, 東京, 47-54, 2000.
- 6) Brown WL & Siemsen DW: Magnification labels for stand magnifiers : Always misleading and usually unachievable. Optometry 79 : 9-17, 2008.
- 7) Lovie-Kitchin JE & Whittaker SG : Prescribing near magnification for low vision patients. Clin Exp Optom 82 : 214-224, 1999.
- 8) 伊藤二良, 中野 功他 : JISハンドブック 24 光学機器. 日本規格協会, 東京, 342, 2007.
- 9) Smith G : Variation of image vergence with change in object distance for telescopes : The general case. Am J Optom Physiol Optics 56 : 696-703, 1974.
- 10) Fonda G: Evaluation of telescopic spectacles (thirty-nine cases changed to simple lenses). Am J Ophthalmol 51 : 433-440, 1961.
- 11) Sloan LL & Jablonski MM: Reading aids for the partially blind. Arch Ophthalmol 62 : 465-484, 1959.
- 12) George CW & Andrew ML: The term magnification. Clin Exp Optom 84 : 113-119, 2001.
- 13) Rubin ML : Optics for Clinicians. Triad Publishing Company, Florida, 233, 1993.

(2009年10月21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
