



再び角倍率について

三宅和夫

筑波大学名誉教授

1. はじめに

この問題について、筆者はすでに1988年、光技術コンタクト誌に「角倍率について」なる一文を発表し¹⁾、大方の注意を喚起したつもりである。今回、「光学」に執筆の機会を与えられたので、今一度私見を披露し、問題の解決、とくに国内に関するかぎりはすっきりした状態になることを期待したい。

前回が問題の提示と解決のための提言に急で、背後の事情などに触れることが少なかったのを改め、「さろん」欄らしく大いに語らせて貰い、最後の判断は読者に委ねるという方針をとりたい。

紙数の関係もあり、前稿と重複するところはなるべく簡単に述べることにする。関心のある方は前稿を参照して下さるようお願いする。

2. 問題の所在

問題の原因を端的に言ってしまうと、以下に述べる定義によって決まる量 M に対して、光学関係者が適当な術語を決めておかなかったことに起因する。そのため一部の人が不適当な言葉を使い出してしまっており、困った事態になったというのが真相である。

その量 M とは『肉眼用光学器械を通して像を見たときの視角を σ' 、物体を光学器械を通さず直接肉眼で見たときの視角を σ とするとき、

$$M = \tan \sigma' / \tan \sigma \quad (1)$$

で定義される(横倍率 β との比較に便利のため、物体は光軸に垂直で一方の側にのみ拡がっていると仮定し、 σ' と σ の比でなく $\tan \sigma'$ と $\tan \sigma$ の比をとる)。

この量 M を、顕微鏡関係の一部の人が、角倍率と呼んでいることが問題である。この角倍率という言葉は、幾何光学の標準的教科書では、まったく違った定義の量 γ として用いられている。その定義を記すと、

『光軸上の像点を通る光線が、光軸となす小さい角 $\Delta\theta'$ 、物点を通るそれに共役な光線が、光軸となす小さい角 $\Delta\theta$ との比 $\Delta\theta' / \Delta\theta$ 』²⁾

である。すなわち、

$$\gamma = \Delta\theta' / \Delta\theta \quad (\text{幾何光学の角倍率}) \quad (2)$$

わが国においては、角倍率の定義は(2)によることが確立しており、日本工業標準規格・光学用語もこれによっている。

問題は角倍率という同一の術語が、幾何光学(理論光学)と顕微鏡(光学器械)というきわめて近接した分野において、まったく違った定義のもとに使用されることである。

3. 問題の発端

筆者達がどうしてもこの問題に気付いたかについては、すでに光技術コンタクト誌に報じたが、ISO(国際標準化機構)のTC 172, SC 5 という顕微鏡の分科会で、顕微鏡の倍率に関する規格を審議したことに始まる。

その規格案において、angular magnification(角倍率)という用語が、前記(1)の定義の量 M に対して用いられていた。筆者の所属しているSC 5 国内委員会では、この言葉の使用を中止するよう申し入れ、百歩譲って使用する場合にも、この言葉には別の定義があることを規格中に明記するように求めてきた。

用語や規格の世界では、早い者勝ちの原則が優先するようなどころがあり、それに日本の国内委員会の駆け引きのまざったこともあって、事情はほとんど改善されず、倍率の規格はそろそろISOの規格になりそうな形勢である。

日本の標準化を担当する事務局では、ISOが決まれば、JIS(日本工業標準規格)もこれに一致するように決めたい意向のようなので、国内委員会は今後対応に苦慮する事態となりそうである。

4. 問題の歴史的展望

ISO加盟の西欧諸国(とくに米英独など)において、どうしてこのような用語がまかり通っているのだろうか。それについて、ある程度客観的なデータとして、筆者らの手元にある英米語およびドイツ語の光学教科書・

専門書において、 γ と M に対してどんな用語が用いられているかを表1、表2に掲げる。これらの表は主として、SC5 国内委員会の和田委員の調査結果によるものである。その他の言語については、筆者らの手元に適当なものなかったという偶然の理由で、取り上げなかった。

以下、これらの表を眺めて、筆者の独断と偏見に満ちた私見を述べることを許されたい。

大分古い昔のことになるが、物理数学の優れた参考書 *Modern Analysis* の著者の一人 Whittaker が、1907年発行の著書 *Theory of Optical Instruments*³⁾ のなかで、 M を magnifying power と呼んで、数学者らし

表1 英米の光学書における γ , M の術語

書名	$\gamma = \Delta\theta' / \Delta\theta$	$M = \tan \sigma' / \tan \sigma$
E. T. Whittaker: <i>The Theory of Optical Instruments</i> , 1907, Cambridge Univ. Press	angular magnification	magnifying power
J. P. Southall: <i>Mirror, Prisms and Lenses</i> , 1918, Macmillan	angular magnification	magnifying power
A. E. Conrady: <i>Applied Optics and Optical Design</i> , Part 1, 1929, Oxford Univ. Press		angular magnification
L. C. Martin: <i>An Introduction of Applied Optics</i> , Vol. II, 1932, Pitman		magnifying power
F. A. Jenkins and H. E. White: <i>Fundamentals of Optics</i> , 1950, McGraw-Hill	angular magnification	angular magnification
L. C. Martin: <i>Technical Optics</i> , Vol. II, 1950, Pitman		magnifying power
M. Herzberger: <i>Modern Geometrical Optics</i> , 1958, Interscience	angular magnification	
M. Born and E. Wolf: <i>Principles of Optics</i> , 1959, Pergamon	angular magnification	magnifying power
W. T. Welford: <i>Geometrical Optics, Optical Instrumentation</i> 1962, North Holland		visual magnification
R. Kingslake: <i>Applied Optics and Optical Engineering</i> , Vol. I, 1965, Academic Press		magnifying power
E. B. Brown: <i>Modern Optics</i> , 1965, Reinhold	angular magnification	angular magnification
L. C. Martin: <i>The Theory of Microscope</i> , 1966, Blackie		angular magnification
Royal Microscopical Society: <i>Dictionary of Light Microscopy</i> , 1989, Oxford Univ. Press		angular magnification

表 2 ドイツ光学書における γ , M の術語

書名	$\gamma = \Delta\theta' / \Delta\theta$	$M = \tan \sigma' / \tan \sigma$
S. Czapski und O. Eppenstein : <i>Grundzüge der Theorie der optischen Instrumente nach Abbe</i> , 1924, Johann Ambrosius Barth	Konvergenzverhältnis, Angular—oder Winkervergrößerung	Vergrößerung subjektiver Bilder, Lupenvergrößerung
M. Herzberger : <i>Strahlen Optik</i> , 1931, Springer	Winkervergrößerung	
K. Röntsch : <i>Die Optik in der Feinmesstechnik</i> , 1949, Carl Hanser	Winkelverhältnis	Betrachtungsvergrößerung
K. Michel : <i>Die Grundlagen der Theorie des Mikroskops</i> , 1950, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft	Angularvergrößerung, Konvergenzverhältnis konjugierter Strahlenpaare	Lupenvergrößerung
J. Picht : <i>Die Grundlagen der geometrisch-optischen Abbildung</i> , 1955, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften	Winkervergrößerung	Lupenvergrößerung
J. Flügge : <i>Leitfaden der geometrischen Optik und des Optikrechnen</i> , 1956, Vandenhoeck		Lupenvergrößerung
K. Michel : <i>Die Mikrophotographie</i> , 1957, Springer		Angularvergrößerung
A. Ehringhaus und L. Trapp : <i>Das Mikroskop</i> , 1958, Teubner		Lupenvergrößerung
R. W. Pohl : <i>Optik und Atomphysik</i> , 1963, Springer		Vergrößerung des Seh winkels
H. C. Claussen : <i>Mikroskope</i> , Hb. d. Phys. XXIX, 1967, Springer		Lupenvergrößerung

く周到で明快な定義と解説を与えていたことである。その内容が優れているのと、歴史的に重要でありながら今日手にすることが困難と考えられるので、付録として magnifying power の節だけを掲げることにする。こんな立派な労作がありながら、どうして今日の混乱が起こったのか、筆者には納得がいかない。

表 1 を眺めていると、初めの間は M の用語として magnifying power が優勢であったのに、近年は angular magnification のほうが勢いを得てきた様子がわかる。

その転回点に立っているのが、電子計算機出現前のレンズ設計法の大家であった英国の Conrady である。そ

の不朽の名著といわれた *Applied Optics and Optical Design*⁴⁾ においては、 M を angular magnification と呼んで、幾何光学の角倍率 γ はいっさい出てこないのである。Conrady 自身は、 M が顕微鏡の場合には肉眼の調節能力のために、望遠鏡の場合のように definite な値をとらないことに言及しているが、顕微鏡と望遠鏡とは、理論的に大きな違いがあることを認識していなかった。

次に表 1 で気のつく立役者は、アメリカの 4 年制大学の光学教科書・参考書として有名だった *Fundamentals of Optics*⁵⁾ の著者 Jenkins-White である。彼らは、

angular magnification の定義として(1)を用いているが、節点を unit positive angular magnification の共役点であるとして、(2)の定義も暗に使用しているのである。手頃な光学書として広く用いられた影響は大きかったと思われる。

これら二つの権威に支えられて、英米では以上に述べてきた困った事態が生じたものと思われる。

表1の最後の行に言及しておこう。Royal Microscopical Society は伝統のある由緒正しい団体であると思われるが、その術語委員会が作業して、RMS Dictionary of Light Microscopy⁶⁾ を1989年に発行した。そのなかでは、角倍率は M で統一し、 γ の影もない有様である。同委員会は、生物学者、解剖学者など顕微鏡の使用者と製造者が主で、理論光学者の参加がなかったようである。この件は今日の事態の原因ではなくて、事態を明白に示す証拠として提示したものである。SC5での困難はこの件と深く関わっているようである。

日本は明治の開国以来、光学ではドイツ流の学問の伝統に従ってきたため、古くは Born⁷⁾、最近では、Born-Wolf⁸⁾ の教科書に従って幾何光学を組み立ててきた。共線写像すなわち射影変換にもとづく理想結像論を展開したこともあって、角倍率は γ であると混乱なくやってきたのである。

ただ、日本語で光学の教科書が出版されている先生のなかには、Jenkins-White に敬意を表してか、 M, γ を同一書中に角倍率として併記している方がおられる。読者の迷惑を考えて早急に善処し、訂正していただきたいものである。

表2を眺めると、Born 先生(ノーベル賞受賞者)を生んだドイツはさすがであり、Michel 以外は慎重に用語を選んでいるようである。どうしてドイツが SC5 において、英米と同じ歩調をとって来たのか、筆者の理解に苦しむところである。Michel の影響が大きかったことが考えられる。

5. 解決策の検討と提言

冒頭の「問題の所在」に述べたように、定義(1)によって決まる量 M に対して、適当な術語を決めておかなかった光学者の怠慢が、このような事態を惹起したと考えられる。したがって早急に適当な術語を決める必要がある。

今日の混乱を招く前であったなら、Whittaker の magnifying power が適当であったと思われる。表1を眺めてみても、慎重で学究肌のように思われる著者達は

magnifying power を使っているようだ。

ところがなぜか米英両国において、これが採用されずに来てしまったことは返す返すも残念であった。Magnifying power という言葉のもつやや漠然とした感じが、 M の術語として内容の明瞭さを欠くとされたのかもしれない。前記の RMS の Dictionary of Light Microscopy においては、magnifying power は magnification とほぼ同義語とされてしまっている。

わが国の光学書の中では、石黒浩三の『光学』⁹⁾ が M に対して「拡大率」を用いており、これは magnifying power に対応する言葉と考えることができる。

ドイツ語の著書に多い Lupenvergrößerung は、拡大鏡(ルーペ)の M を求めた $M=250/f'$ を意味する場合が多く、肉眼用光学器械一般に対する M の用語としては不適當である。

残るは Welford の visual magnification, Rantsch の Betrachtungsvergrößerung と Pohl の Vergrößerung des Schwinkels 辺りから選ぶことになる。

筆者は、光技術コンタクト誌に記したように、 M の術語として「視角倍率」を提唱したい。英語は、RMS が視角を viewing angle と呼んでいることから、viewing angle magnification ということになる。

幾何光学の角倍率 γ は、縦倍率 α 横倍率 β とともに、共役な量の比になっており、これら三つの倍率の間には、 $\alpha\gamma=\beta$ なる関係式が成立する。

ところが、 M で問題となる二つの視角は(望遠鏡の場合を除き)共役な量ではなく、また Conrady も言及しているように、観察条件によって変化する量である。

そこで、筆者の本心をいえば、倍率という言葉は共役な量の比のために除けておきたいので、 M は視覚比としたいところである。しかし、これは表1、表2の著者達が M を magnification と呼ぶことを是としているので、残念ながら撤回する。

6. おわりに

M の術語として、筆者は「視角倍率」を提唱する。しかし筆者の意見を固執するものではない。言葉というものは、多くの方の賛成をえて、使われなければ、どんなに学問的、理論的に正しくても無意味である。広い範囲の方々によって議論していただきたい。

筆者の勝手をいわせていただければ、たとえば、学会会議の応用物研連の光学専門委員会か、JIS の光学用語の専門委員会できり上げて貰えないであろうか。

文 献

- 1) 三宅和夫: “角倍率について”, 光技術コンタクト, 26 (1988) 205-207.
- 2) 日本工業規格・光学用語 JIS Z 8120, B 37.
- 3) E. T. Whittaker: *The Theory of Optical Instruments*, Cambridge Tracts in Mathematical Physics, No. 7 (Cambridge University Press, London, 1907) p. 23,
- 4) A. E. Conrady: *Applied Optics and Optical Design*, Part 1 (Oxford Univ. Press, London, 1929) pp. 466-469.
- 5) F. A. Jenkins and H. E. White: *Fundamentals of Optics*, 3rd ed. (McGraw-Hill, New York, 1957) pp. 174-176 (1st ed. 1937).
- 6) Royal Microscopical Society: *RMS Dictionary of Light Microscopy*, Microscopy Handbooks 15 (Oxford Univ. Press, London, 1989).
- 7) M. Born: *Optik* (Springer, Berlin, 1933) (2te Aufl. 1957).
- 8) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 2nd ed., 4th ed. (Pergamon Press, London, 1965, 1970).
- 9) 石黒浩三: 光学 (裳華房, 東京, 1989) p. 32.

付 録

E. T. Whittaker; *The Theory of Optical Instruments*. Cambridge Tracts in Mathematics and Mathematical Physics, No. 7 (Cambridge University Press, 1907), p. 23.

17. The magnifying power of a visual instru-

ment.

We define the magnifying power of a visual instrument employed to examine near objects as the ratio of the angle subtended by the image of an object at the eye, when the object is so placed that the image is at a standard distance (generally taken to be 25 cm.) from the eye, to the angle subtended by the object when viewed directly with the eye at the standard distance.

The magnifying power is therefore equal to the ratio of the heights of the image and object respectively when the image is situated at the standard distance in front of the exit-pupil of the instrument, i. e. it is equal to the linear magnification when the image is in this position.

When a visual instrument is used for the examination of objects at infinity, as in the case of the astronomical telescope, it is natural to define the magnifying power as the angular magnification at the pupils; this by Helmholtz's theorem (§ 7) is equal to the reciprocal of the linear magnification at the pupils, so the magnifying power is equal to the ratio of the radius of the entrance-pupil to the radius of the exit-pupil.

(1990年7月31日受理)

第 15 回光学シンポジウム参加報告

徳 光 純

キヤノン(株)中央研究所 〒243-01 厚木市森の里若宮 5-1

第 15 回光学シンポジウム (光学技術・学術講演会) (主催: 日本光学会) が 1990 年 6 月 22 日, 東京大学生産技術研究所において開催された。サブタイトルの「最近の光学設計を中心として」が示すようにレンズ設計に関する講演が大半を占めるものであった。250 名に近い参加者が集まり, 会場となった会議室は通路にまで椅子が並べられる盛況であった。実行委員長の桑山哲郎氏 (キヤノン) の開会の挨拶があった後各講演が行われた。以下に講演の内容を簡単に紹介する。

最初の講演は高野栄一氏 (光科学研) による収差の表示に関するものであった。特定の収差を選択しそれによって生ずる像面の収差図形をコンピュータのカラーモニター上に表示するプログラムが開発された。焦点外れが

あるときの 5 次収差図形など数式ではわかりにくいものがモニター上に明快に示されていた。

第 2 番目の講演は伊藤雅英氏ら (東大生研) による光ディスク用単レンズの設計についての報告である。両面非球面で球面収差, コマ収差のない単レンズの設計法と設計例を示し, さらに温度変化による収差発生解析結果を発表した。レンズの使用可能な温度範囲は許容される波面収差の rms 値に比例し NA 値の 4 乗に反比例するという結果が得られていた。

第 3 番目の講演も非球面単レンズの設計に関するものであり中川治平氏 (中川レンズデザイン研) より発表があった。子午光線の追跡式より正弦条件の式を求め, これを基に正弦条件と球面収差の係数の値を小さくするよ