

## ズームレンズの新フォーカシング方式

得 丸 祥

ミノルタカメラ(株)技術センター 〒 590 堺市大仙西町 3-91

(1983年3月17日受理)

### A New Focusing System of a Zoom Lens

Hisashi TOKUMARU

Technical Center, Minolta Camera Co., Ltd.,  
3-91, Daisen-Nishimachi, Sakai 590

A new focusing system of a zoom lens is examined. By this new method, the focus plane of the zoom lens does not move substantially during zooming even if the front group is not used in focusing. The condition is as follows:  $(f_A \cdot \beta_F) / \sqrt{\beta_F^2 - 1} = \text{constant}$ . Of course, the lateral magnification  $\beta_F$  of the focusing lens group changes continuously during zooming. And  $f_A$  is the focal length of the whole of lens group which is on the object side of the focusing lens group.

#### 1. はじめに

従来、ズームレンズはズーム部より物体側に設けたレンズ群の繰出しにより無限遠から至近撮影距離までのフォーカシングを行ってきた。この方式は前群繰出し方式と呼ばれ、どの焦点距離においても、同一撮影距離に対し、ほぼ同一の繰出し量(前群がズーム時移動しない場合では正確に同じ繰出し量)でフォーカシング可能であり、焦点距離によりフォーカシング移動量の差が生じる全体繰出し方式やズームレンズ系の一部を移動させる方式に比べ大きな有利さをもっている。

最近、35mm スチール用レンズにおいて広角域を含む高変倍率ズームレンズの開発が急速に進み、正レンズ群先行のズームタイプが性能や大きさ上有効と考えられているようである<sup>1)</sup>。広角端が  $f=35$  mm のズームレンズでは最短撮影距離を 1.5 m 程度にすることで前群繰出し方式が使用されているが、より広角の  $f=28$  mm から始まる場合、レンズ径の増大や撮影距離変化による収差変動がより対処困難となるため、フォーカシング方式自体が問題になってくるようである。カムを用いて機械的に補正した汎用性のあるフォーカシング方式<sup>2)</sup>も提案されているが、ここでは、ズームレンズのインターナルフォーカシング方式またはリアフォーカシング方式

で、フォーカシングレンズ群の同一移動量に対し、各焦点距離において像点を焦点深度内に収めうる新しい方式を報告する。

#### 2. 前群繰出しと異なるフォーカシング方式の近似式

##### 2.1 フォーカシングレンズ群が1群の場合

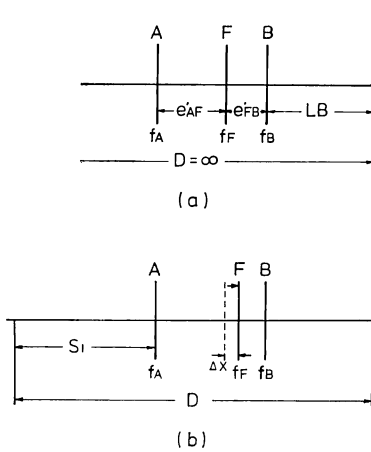
この場合の近似式はすでに報告されている<sup>2)</sup>。ここでは、薄肉近似を用いてより一般的に取り扱った結果を述べる。

**Fig. 1** は一般的なズームレンズのある焦点距離での薄肉近似による構成図で、 $f_F$  がフォーカシングレンズ群(F)の焦点距離、 $f_A$  がフォーカシングレンズ群より物体側にあるレンズ群(A)の焦点距離、そして  $f_B$  がフォーカシングレンズ群より像面側にあるレンズ群(B)の焦点距離とし、レンズ群(F)が  $\Delta X$  像面側へ移動したとき撮影距離  $D$  は無限遠からある有限距離になるとする。

**Fig. 1** の構成から、全系の焦点距離  $f$  は

$$f = f_A \beta_F \beta_B \quad (1)$$

で与えられ、ここで  $\beta_F$ 、 $\beta_B$  はそれぞれレンズ群(F)、(B)の撮影距離  $D$  が無限遠での横倍率である。(1)式の  $f$  はズーム時変化することから、 $f_A$ 、 $\beta_F$ 、 $\beta_B$  のう



**Fig. 1** Schematic illustration of a thin lens system.  
(a) in infinite position, (b) in close focusing position.

ち少なくとも一つは変化し、短焦点側から長焦点側へのズームング時、その絶対値の変化が増大するレンズ群はズーム部か、またはズーム部を含んでいるかである。また、撮影距離  $D$  とレンズ群 (F) の移動量  $\Delta X$  の関係は次のように表わせる。

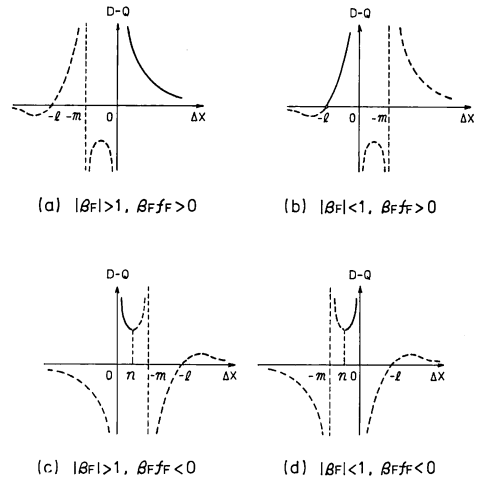
$$(D-Q) \frac{\Delta X \left\{ \Delta X + (\beta_F^2 - 1) \left( \frac{f_F}{\beta_F} \right) \right\}}{\Delta X + \beta_F f_F} = f_A^2 \quad (2)$$

$$Q = f_A + e_{AF}' + e_{FB}' + LB$$

ここで  $e_{AF}'$ ,  $e_{FB}'$  は **Fig. 1** に示された各レンズ群の薄肉間隔,  $LB$  は薄肉のレンズバックである。

ここで(1), (2)式における符号について述べておく。(1)式の  $f$  は全系の焦点距離であるから正でなければならない。他の焦点距離と横倍率は、(1)式が正という条件下で、正負をとりうる。フォーカシングレンズ群 (F) の移動量  $\Delta X$  は、レンズ群 (F) が像側へ移動するとき正、物体側へ移動するとき負である。

(2)式が、フォーカシングレンズ群が1群の場合の基本となる薄肉近軸式である。**Fig. 2** は、(2)式で移動量  $\Delta X$  と撮影距離を含む項  $(D-Q)$  とを軸にとり、 $\beta_F f_F$ ,  $\beta_F^2 - 1$  のそれぞれの正負による曲線を概略的に示したもので、実線が、撮影距離  $D$  が無限遠のとき  $\Delta X = 0$  を満足するフォーカシング可能な曲線である。図中の  $n$  は  $\Delta X = -\beta_F f_F + f_F$  または  $-\beta_F f_F - f_F$  を満足する点で、これはレンズ群 (F) の横倍率  $\beta_F$  が  $+1$  または  $-1$  の等倍になるまでのレンズ群 (F) の移動量を表わしている。



**Fig. 2** Graphic illustration showing a relationship between a shifting distance  $\Delta X$  for focusing and a value  $(D-Q)$  relating to an object distance, wherein  $l = \beta_F f_F$ ,  $m = (\beta_F^2 - 1) f_F / \beta_F$ ,  $n = -\beta_F f_F \pm f_F$ .

**Fig. 2** から、レンズ群 (F) はその横倍率  $\beta_F$  が、 $|\beta_F| > 1$  のとき像面側へ、 $|\beta_F| < 1$  のとき物体側へそれぞれ移動することがわかる<sup>3)</sup>。 $|\beta_F| = 1$  のときは、**Fig. 2** で  $m = 0$  となることから、 $\beta_F f_F < 0$  のとき  $D = \infty$  で  $\Delta X = 0$  を満足する曲線はなくなるためフォーカシング不可能となり、 $\beta_F f_F > 0$  のとき  $D = \infty$  で  $\Delta X = 0$  を満足する曲線は  $\Delta X > 0$  と  $\Delta X < 0$  の範囲で二つ存在するので、像面側、物体側どちらに移動してもフォーカシング可能となる。(2)式から得られるこのような結果はズームレンズに限定されるものでなく、固定焦点レンズのフォーカシングにも適用できる。

次に、ズームレンズの全焦点距離範囲にわたって、同一の撮影距離に対し、同一の移動量を与える条件を考える。それは(2)式がズームング中、常に満足されることである。(2)式において、ズームング時  $f_A$  を一定とすると、 $\beta_F f_F$ ,  $(\beta_F^2 - 1) f_F / \beta_F$  がズームング時一定でなければならない。これは、 $f_A$ ,  $\beta_F$ ,  $f_F$  がズームング時変化しないことになり、従来の前群繰出し方式の変形と考えられる。ただし、特殊解として  $\beta_F = \infty$  の場合があり、このとき(2)式は次のようになる。

$$(D-Q)\Delta X = f_A^2 \quad (3)$$

(3)式はズームング時  $f_A$  が一定でかつレンズ群 (F) の後でアフォーカル部を有するズームレンズにおいて、レンズ群 (F) を像面側へ、焦点距離  $f_A$  の前群繰出し方式の移動量と同じでフォーカシングできることを表わしている。このフォーカシング方法は、マスターレンズ

部を有する3成分機械補正式ズームレンズですでに考えられている<sup>4)</sup>。前群はフォーカシングのとき移動しないが、前群繰出しと同じ移動量が必要なので、そのための空気間隔をズームレンズ内に確保しておかなくてはならない。結局、この方式は前群繰出し方式が可能なズームレンズで使用可能と考えられる。

(2)式において、 $f_A$  をズーミング時可変にすると、明らかに、ズーミング時(2)式の示すフォーカシング可能な曲線は焦点距離により異なる。よってこの場合は、同一のフォーカシング移動量に対して、ズームレンズの像点がズーミングによって変化しても、これが焦点深度内に収まるようにその条件を考えることになる。(2)式の移動量  $\Delta X$  を含む項を次のように変形する。

$$\frac{\Delta X \left\{ \Delta X + (\beta_F^2 - 1) \left( \frac{f_F}{\beta_F} \right) \right\}}{\Delta X + \beta_F f_F} = \Delta X - \frac{f_F}{\beta_F} + \frac{f_F^2}{\Delta X + \beta_F f_F} \quad (4)$$

ここで、

$$|\beta_F f_F| \gg |\Delta X| \quad (5)$$

の条件を導入する。そうすると(4)式右辺の第3項は次のように近似できる。

$$\frac{f_F^2}{\Delta X + \beta_F f_F} \doteq \frac{f_F}{\beta_F} \left\{ 1 - \frac{\Delta X}{\beta_F f_F} + \left( \frac{\Delta X}{\beta_F f_F} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

よって、(4)式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta X \left\{ \Delta X + (\beta_F^2 - 1) \left( \frac{f_F}{\beta_F} \right) \right\}}{\Delta X + \beta_F f_F} \\ = \frac{\beta_F^2 - 1}{\beta_F^2} \cdot \Delta X + \frac{1}{\beta_F^3 f_F} \cdot (\Delta X)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

(7)式を用いて、(2)式を次のように近似する。 $\beta_F^2 \approx 1$  のとき、(7)式右辺の第1項までの近似で

$$(D-Q)\Delta X = f_A^2 \beta_F^2 / (\beta_F^2 - 1) \quad (8)$$

となる<sup>2)</sup>。

$\beta_F^2 = 1$  のとき、(7)式右辺の第2項までの近似で

$$(D-Q)(\Delta X)^2 = \pm f_A^2 f_F \quad (9)$$

となる。ここで右辺の符号は  $\beta_F = \pm 1$  に対応するものである。(5)式の条件は、フォーカシングによるレンズ群(F)の横倍率の変化量  $\Delta X/f_F$  が横倍率  $\beta_F$  に比べて微小であることを示している。

(8)式と(9)式、とくに(8)式がフォーカシングレンズ群が1群の場合の、全ズーミング範囲中、同一撮影距離に対して同一の移動量を与えるための基本となる近似式である。

## 2.2 フォーカシングレンズ群が $m$ 群の場合

ズームレンズが、ズーミング時のレンズ群構成とは別

にフォーカシング時  $m$  群以上のレンズ群で構成されているとし、第1群から第  $m$  群までのすべてのレンズ群が移動する場合に、 $m$  群のすべてに(5)式の条件を適用して(8)式を拡張すると次のようになる。

$$(D-Q)\Delta X = P \quad (10)$$

ただし、

$$\begin{aligned} P = & f_1^2 \beta_2^2 \beta_3^2 \dots \beta_m^2 / \{ -K_1 \beta_2^2 \beta_3^2 \dots \beta_m^2 \\ & + K_2 (\beta_2^2 - 1) \beta_3^2 \dots \beta_m^2 + \dots + K_{m-1} (\beta_{m-1}^2 - 1) \beta_m^2 \\ & + K_m (\beta_m^2 - 1) \} \end{aligned}$$

$$Q = f_1 + \text{レンズ全長} + \text{レンズバック}$$

ここで  $f_1$  は第1群の焦点距離、 $\beta_i$  はフォーカシング時移動する第  $i$  群の  $D = \infty$  での横倍率である。また、 $K_i$  はフォーカシング時移動する第  $i$  群の移動係数を表わしており、第  $i$  群のみが移動するときは  $K_i = 1$  の値をとり、2群以上移動するときは正負の値をとりうる。 $K_i > 0$  のとき像面側へ、 $K_i < 0$  のとき物体面側へ移動するが、第1群のみ ( $-K_1$ ) の符号で移動方向が決まる。

フォーカシング時移動するレンズ群はズーミングと無関係な任意のレンズまたはレンズ群であってもよいが、近接時の収差変動と鏡胴構成を考慮すると、ズームレンズを構成している各レンズ群を基本的な単位として採用することが適当である。この点から、実際に適用できるフォーカシングレンズ群の数は2群が限度と考えられる。

フォーカシング時移動するレンズ群が第2群と第4群の場合を考えると、(10)式から

$$(D-Q)\Delta X = P \quad (11)$$

ただし、

$$P = \frac{f_1^2 \beta_2^2 \beta_3^2 \beta_4^2}{K_2 (\beta_2^2 - 1) \beta_3^2 \beta_4^2 + K_4 (\beta_4^2 - 1)}$$

と与えられる。2群移動の場合、隣接したレンズ群も考慮され、このとき第2群と第3群とが移動するとして、(11)式の  $P$  は次のようになる<sup>3)</sup>。

$$P = \frac{f_1^2 \beta_2^2 \beta_3^2}{K_2 (\beta_2^2 - 1) \beta_3^2 + K_3 (\beta_3^2 - 1)} \quad (12)$$

(12)式は(11)式で、 $\beta_3^2, \beta_4^2, K_4$  をそれぞれ  $1, \beta_3^2, K_3$  に置換することに相当している。

(11)式と(12)式がフォーカシングレンズ群が前群以外の2群の場合の基本となる近似式である。

フォーカシングレンズ群が2群の場合も、1群の場合と同じようにフォーカシングレンズ群の横倍率が式に表われない、すなわち  $\beta_2$  の値によらず成立する特殊解が存在し、そのときの撮影距離  $D$  と移動量  $\Delta X$  の関係は(3)式と同じように

$$(D-Q)\Delta X = f_1^2/K_2 \quad (13)$$

と与えられる。ここで、 $K_2$ の値は+1または-1である。第1群の焦点距離  $f_1$  がズーム時変化しないならば、どの焦点距離でも同一移動量で同一撮影距離にフォーカシング可能となる。ただし、移動量は第1群による前群繰出しのときと同じである。(13)式を与える条件は、(11)式と(12)式において分母をそれぞれ  $K_2\beta_2^2\beta_3^2\beta_4^2$  と  $K_2\beta_2^2\beta_3^2$  に等しいとおくことにより、ズーム時次の関係をそれぞれ満足することである。

$$\beta_3^2 = K \left(1 - \frac{1}{\beta_4^2}\right), \quad K = \frac{K_4}{K_2} \quad (14)$$

$$\frac{\beta_3^2}{\beta_3^2 - 1} = K, \quad K = \frac{K_3}{K_2} \quad (15)$$

(14)式または(15)式を従来の正負負3成分機械補正式ズームレンズに適用した例はあるが<sup>53)</sup>、この方式も前群繰出しが可能な場合にしか使用できない。

### 3. 新フォーカシング方式のズームレンズ

#### 3.1 フォーカシングレンズ群が1群の場合

##### 3.1.1 原理

(8)式において、ズーム時、

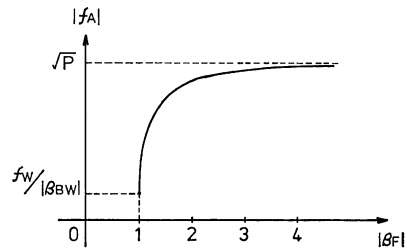
$$P = \frac{f_A^2 \beta_F^2}{\beta_F^2 - 1} = \text{一定} \quad (16)$$

$$Q = \text{一定} \quad (17)$$

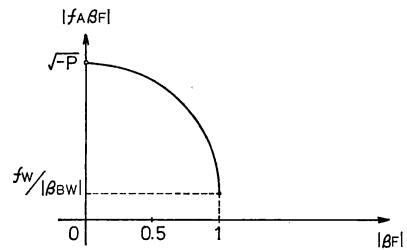
の条件が満足されれば、全焦点距離範囲にわたって、(8)式が表わす双曲線の形状が同じとなる。(17)式はレンズ全長や  $f_A$  が変化した場合成立しなくなるが、通常の1m程度の最短撮影距離であれば(17)式は成立すると考えられる。よって、ズーム時(16)式が成立するズームレンズを考えることが重要である。

(16)式における  $f_A$  と  $\beta_F$  の変化を考える場合、(1)式で与えられる全系の焦点距離の変化を考慮する必要がある。この点を考えてグラフ化したのが Fig. 3 である。ズームレンズでは構成している部分系の焦点距離や横倍率の絶対値での増減が問題となるので、Fig. 3 では両方の軸ともに絶対値を使用している。説明のため、 $|\beta_F|$ の1との大小により、縦軸が異なる。なお、 $|\beta_F|=1$ のときは  $\beta_F f_F > 0$  を満足するズームレンズがフォーカシング可能である。

ここで、 $f_A$  が変化することはレンズ群(A)が少なくとも2群から構成されていることを意味しており、フォーカシングレンズ群(F)までを考えると、ズームレンズとしては少なくとも3群構成が必要である。レンズ群(B)によりズーム比拡大の可能性があるにしても、新し



(a)  $|\beta_F| > 1, |f_A| = \sqrt{P} \sqrt{1 - \frac{1}{\beta_F^2}}$



(b)  $|\beta_F| < 1, |f_A \beta_F| = \sqrt{P} \sqrt{1 - \beta_F^2}$

**Fig. 3** (a) Graphic illustration showing a relationship between the lateral magnification  $\beta_F$  of the focusing lens group and the focal length  $f_A$  of the lens group located at the object side of the focusing lens group when  $|\beta_F| > 1$ . (b) Graphic illustration showing a relationship between  $\beta_F$  and  $f_A \beta_F$  when  $|\beta_F| < 1$ .

$f_w$ : shortest focal length of the whole lens system.

$\beta_{Bw}$ : lateral magnification of the lens group B at the shortest focal length position.

いフォーカシング方式に必要な3群をズーム比に寄与させることが望ましい。

Fig. 3の  $|\beta_F| > 1$  の場合、前群の焦点距離とフォーカシングレンズ群の横倍率はともに増倍または減倍の関係になっており、当然、短焦点側を基準としたときともに増倍の関係をを用いることになる。まず、 $|f_A|$  の変化によって得られるズーム比を考える。レンズ群(F)の横倍率  $\beta_F$  が、ある短焦点側での横倍率  $\beta_{FW}$  から無限遠まで変化したときの  $|f_A|$  のズーム比はグラフから左辺のように定義されて、これは次のように表わされる。

$$\frac{\sqrt{P}}{|f_{Aw}|} = \frac{|f_{Aw} \cdot \beta_{FW}|}{\sqrt{\beta_{FW}^2 - 1}} \Big/ |f_{Aw}| = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{\beta_{FW}^2}}}$$

ここで、 $f_w$  は短焦点側での全系の焦点距離、 $f_{Aw}$ 、 $\beta_{FW}$  はそれぞれ  $f_A$ 、 $\beta_F$  の短焦点側での値である。上式か

ら、 $\beta_{FW}^2=1$  の場合を除いた  $|f_A|$  の変化によって得られる最大ズーム比の概略値が求まる。 $|\beta_{FW}|$  の値が 1.1, 1.2 のとき、上式はそれぞれ 2.4, 1.8 となり、0.1 の差でかなり大きく異なる。このことから、 $|f_A|$  のズーム比を大きくするには、 $|\beta_{FW}|$  をなるべく 1 に近づける必要がある。また、 $|f_A|$  のかわりに  $|\beta_F|$  の変化でズーム比を大きくすることも可能であるが、 $|\beta_{FW}|$  を 1 より離すにしたがって、同じズーム比を得るためのレンズ群 (F) の移動量が増大しズームレンズを構成させることが困難となる。よって、 $|\beta_{FW}|$  を 1 近傍にし、レンズ群 (A), (F) とともにズーム部として構成させることが有利である。

**Fig. 3** の  $|\beta_F| < 1$  の場合、 $|f_A\beta_F|$  と  $|\beta_F|$  は増倍と減倍またはその逆の関係になっており、 $f_A\beta_F$  がフォーカシングレンズ群までの焦点距離を表わしていることから、短焦点側を基準としたとき、 $|f_A\beta_F|$  が増倍、 $|\beta_F|$  が減倍の関係を用いることになる。 $|f_A\beta_F|$  の変化によるズーム比は、上記  $|\beta_F| > 1$  の場合の  $|f_A|$  と同様に考えることにより、 $1/\sqrt{1-\beta_{FW}^2}$  となる。これから、 $|\beta_{FW}|$  が 0.9, 0.8 のときそれぞれ 2.3, 1.7 が得られる。 $|f_A|$  はズーミングにより変化する必要から少なくとも 2 群で構成されるので、結局フォーカシングレンズ群までは少なくとも 3 群必要になる。このことと、上記ズーム比程度の値と  $|\beta_F|$  自身減倍になることをあわせて考えると、 $|\beta_F| < 1$  の場合では高倍率化に余裕がないことがわかる。

以上より、(16) 式を  $|\beta_F| > 1$  で、短焦点側の横倍率  $\beta_{FW}$  をなるべく 1 に近づけることにより高倍率比のズームレンズがインターナルまたはリアフォーカシング方式で達成できる可能性が生じる。

3.1.2 近軸例

3.1.1 項の原理を用いて近軸例を求める。前に述べたように、新フォーカシング方式のズームレンズのズーミング時における最小の構成レンズ群数は 3 群である。この場合はリアフォーカシング方式となり、(1) 式の  $\beta_B$  はいらなくなる。3 群構成としては、正負正または負正負がまず考えられるが、広角域を含む高変倍率ズームレンズへの適用を想定して、正レンズ群先行の正負正のタイプを取り上げる。

正負正の 3 群タイプのズームレンズにおいては、広角側での逆望遠タイプの採用と (1) 式から、 $f_A < 0, \beta_F < 0$  の場合を考えることになる。フォーカシングレンズ群については、その横倍率が重要で焦点距離  $f_F$  は適当に決められる。よって、短焦点側での横倍率  $\beta_{FW}$  を  $-1.2$

**Table 1** Paraxial example of a thin lens system.

(W)	$f_W=28$			
	$f_{AW}$	-23.333	$e_{AFW}'$	54.056
	$f_{FW}$	42.212	$LB_W$	92.866
(M)	$f_M=60$			
	$f_{AM}$	-34.522	$e_{AFM}'$	31.978
	$f_{FM}$	42.212	$LB_M$	115.576
(T)	$f_T=135$			
	$f_{AT}$	-40.299	$e_{AFT}'$	14.514
	$f_{FT}$	42.212	$LB_T$	183.618

**Table 2** Change in the object distance in relation to the shifting distance of the focusing lens group.

Shifting distance of the focusing lens group (mm)	Object distance (m)		
	$f_W=28$	$f_M=60$	$f_T=135$
0.2	9.11	9.02	9.07
0.5	3.77	3.69	3.72
1.0	1.99	1.91	1.94
1.5	1.40	1.31	1.35
2.0	1.11	1.02	1.05
2.5	0.93	0.84	0.87
3.0	0.82	0.72	0.75
3.5	0.74	0.64	0.67
4.0	0.68	0.57	0.61

に選ぶと、(16) 式と (1) 式から近軸解が得られる。それを **Table 1** に示す。ここで、 $f_F=42.212$  は適当に決めた値である。また、この近軸例で、フォーカシングレンズ群を像面側に移動させたときの撮影距離の値を **Table 2** に示す。

**Table 1** の近軸解から、このズームレンズはレンズ群 (A), (F) とともにズーム部を構成しているが、新しいフォーカシング方式を達成するため、短焦点側ではレンズ群 (A)、長焦点側ではレンズ群 (F) がそれぞれズーム比を拡大する役割を担っている。また、焦点距離  $f_F$  は必要とするレンズバックから限定されうるが、他の値を選んでも、フォーカシング方式そのものあまり影響を与えない。

**Table 2** において、 $f_T=135$  の撮影距離と移動量を基準としたときの  $f_W=28, f_M=60$  での像点変位量は、撮影距離 0.61 m のとき、それぞれ +0.18, -0.47 と大きいのが、撮影距離 1.05 m のときは、+0.04, -0.14 と小さな値を示す。**Table 2** の撮影距離のばらつきに比べ、 $f_W=28$  での像点変位量が小さいことは、ズームレンズの撮影倍率が小さいことに対応している。中間焦

点  $f_M=60$  での像点変位量を小さくするには、横倍率  $\beta_F$  を変化させるか、または(2)式から明らかなように、 $f_F$  を変化させることにより対処可能である。たとえば、Table 1 の  $f_{FT}$  の値を  $0.85 f_F$  にすることにより、 $f_T=135$  の撮影距離と移動量は、Table 2 の  $f_M=60$  の値と同じにできる。

以上近軸例より、最短撮影距離が1m程度であれば、概略(16)式に従うズームレンズは、リアまたは、インターナルフォーカシング方式により、全撮影距離範囲でズームリングしても、その像点変位量を焦点深度内に収めうるものである。

3.1.3 設計例と検討

3.1.2 項の近軸例に沿って実際に設計するとき、とく

に問題となるのはフォーカシングレンズ群のズーム時の移動量である。Table 1 からこの移動量は90mm程度と非常に大きく、このままでは実現不可能である。この問題に対処する第1の方法は、フォーカシングレンズ群の像側に全体のズーム比を減少させるレンズ群を導入することである。このことにより、フォーカシングレンズ群の横倍率の変化は減少し、結果的にその移動量が小さくなる。第2の方法は、フォーカシングレンズ群の焦点距離を短焦点側から長焦点側へのズーム時、小さくし、その際フォーカシングレンズ群の主点位置を効果的に変化させることにより移動量を減らすものである。

設計例では上記第2の方法を用いて、フォーカシング

Table 3 Design datum of the designed zoom lens.

		$f=28.8\sim 60.0\sim 131.5$		$F_{No.}=3.6\sim 4.3\sim 5.0$					
		Radius of curvature	Axial distance	Refractive index ( $N_d$ )		Abbe number ( $\nu_d$ )			
A	A <sub>I</sub>	$r_1$	151.922	$d_1$	2.000	$N_1$	1.84666	$\nu_1$	23.88
		$r_2$	75.884	$d_2$	7.500	$N_2$	1.69100	$\nu_2$	54.75
		$r_3$	6,237.910	$d_3$	0.120				
		$r_4$	39.584	$d_4$	4.000	$N_3$	1.67000	$\nu_3$	57.07
		$r_5$	52.025	$d_5$	0.600	~ 25.100 ~ 34.600			
	A <sub>II</sub>	$r_6$	40.307	$d_6$	1.200	$N_4$	1.77250	$\nu_4$	49.77
		$r_7$	17.719	$d_7$	7.500				
		$r_8$	-147.765	$d_8$	2.500	$N_5$	1.75000	$\nu_5$	25.14
		$r_9$	-66.964	$d_9$	1.100	$N_6$	1.75450	$\nu_6$	51.57
		$r_{10}$	36.734	$d_{10}$	2.000				
		$r_{11}$	25.771	$d_{11}$	3.500	$N_7$	1.75000	$\nu_7$	25.14
		$r_{12}$	472.543	$d_{12}$	1.800				
		$r_{13}$	-56.807	$d_{13}$	1.100	$N_8$	1.77250	$\nu_8$	49.77
		$r_{14}$	51.639	$d_{14}$	25.014	~ 11.987 ~ 2.000			
F	F <sub>I</sub>	$r_{15}$	104.369	$d_{15}$	2.500	$N_9$	1.69100	$\nu_9$	54.75
		$r_{16}$	-103.704	$d_{16}$	0.120				
		$r_{17}$	47.729	$d_{17}$	1.500	$N_{10}$	1.84666	$\nu_{10}$	23.88
		$r_{18}$	20.201	$d_{18}$	8.000	$N_{11}$	1.58913	$\nu_{11}$	61.11
		$r_{19}$	-97.798	$d_{19}$	0.120				
		$r_{20}$	39.409	$d_{20}$	4.000	$N_{12}$	1.58913	$\nu_{12}$	61.11
		$r_{21}$	-94.078	$d_{21}$	1.200	~ 9.166 ~ 22.565			
	F <sub>II</sub>	$r_{22}$	-75.491	$d_{22}$	3.500	$N_{13}$	1.80518	$\nu_{13}$	25.43
		$r_{23}$	-19.616	$d_{23}$	1.100	$N_{14}$	1.77250	$\nu_{14}$	49.77
		$r_{24}$	41.966	$d_{24}$	22.865	~ 14.899 ~ 1.500			
	F <sub>III</sub>	$r_{25}$	-206.856	$d_{25}$	4.000	$N_{15}$	1.51680	$\nu_{15}$	64.12
		$r_{26}$	-36.148	$d_{26}$	0.120				
		$r_{27}$	3,576.025	$d_{27}$	6.500	$N_{16}$	1.51680	$\nu_{16}$	64.12
		$r_{28}$	-24.056	$d_{28}$	1.501				
		$r_{29}$	-22.233	$d_{29}$	1.400	$N_{17}$	1.84666	$\nu_{17}$	23.88
		$r_{30}$	-42.663						

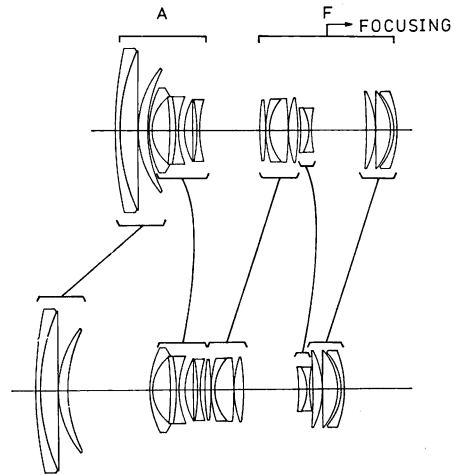
$\Sigma d = 118.360 \sim 129.833 \sim 129.346$

**Table 4** Values for  $f_A$ ,  $\beta_F$ ,  $f_F$ ,  $\sqrt{P}$  at each zoom position.

$f$	$f_A$	$\beta_F$	$f_F$	$\sqrt{P}$
28.8	-23.26	-1.24	42.32	39.46
60.0	-31.76	-1.89	36.17	37.44
131.5	-37.00	-3.55	25.18	38.56

**Table 5** Image plane deviations at wide- and middle-zoom positions based on tele-zoom position.

Object distance (m)	Shifting distance of the focusing lens group at $f=131.5$ (mm)	Image plane deviation (mm)	
		$f=28.8$	$f=60.0$
50.0	0.030	0.001	-0.004
30.0	0.050	0.001	-0.007
20.0	0.074	0.002	-0.011
15.0	0.099	0.003	-0.014
10.0	0.149	0.005	-0.021
7.0	0.214	0.007	-0.030
5.0	0.301	0.011	-0.040
4.0	0.377	0.015	-0.049
3.0	0.505	0.023	-0.062
2.5	0.608	0.031	-0.072
2.0	0.765	0.043	-0.085
1.7	0.904	0.057	-0.094
1.5	1.030	0.070	-0.101



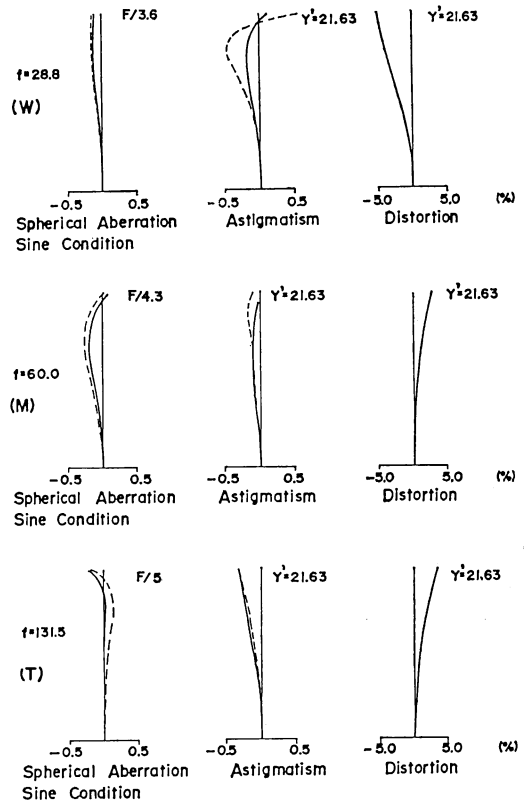
**Fig. 4** Schematic cross sectional view of a designed zoom lens at the shortest focal length position and the longest focal length position.

レンズ群を3群構成としている。Fig. 4 に設計例のズームレンズを短焦点側からの構成で示した。そしてこの系の構成データを Table 3 に、また主要な変数の数値を Table 4 に示す。Fig. 5 は各焦点距離での無限遠時の諸収差図を、Table 5 は焦点距離 131.5 での移動量を基準としたときの短焦点側と中間焦点での像点変位量を示している。

上記設計例の諸データにより、ズーム比 4.6 倍の広角域を含む高変倍率ズームレンズで、前群繰出し方式と同等の効果を有する新しいフォーカシング方式が達成できることが示された。

次にこの設計例をふまえて検討を行なう。

フォーカシング時の移動量は Table 5 から明らかにように小さな値を示している。移動量  $\Delta X$  は(8)式から(16)式の条件により、 $\beta_F^2=2$  すなわち  $\beta_F=-\sqrt{2}$  のときの全系の焦点距離での全体繰出し方式の移動量と同じになる。設計例では、この焦点距離は、Table 4 での  $\sqrt{P}$  の値、すなわちおよそ 38 mm となる。よって、広角域を含む高変倍率ズームレンズに適したフォーカシ



**Fig. 5** Aberration curves for three zoom positions.

ング移動量を与える方式といえる。

設計例での問題点としては、長焦点側での  $f_A$  の変化が小さく、 $\beta_F$  の変化が大きいため、軸上光束の各レンズ群への入射高さが高くなるため、製造時の公差が厳しいものになりやすいことである。このことにより、設計例のズーム比よりも高倍率のズームレンズを設計するときには、フォーカシングレンズ群の像面側でズーム比を確保できるレンズ群を導入させることにより、全体のズーム比に対してフォーカシングレンズ群までのズーム比を軽減させる必要がある。このとき、Fig. 3 に示された曲線において、直線的な部分の使用が可能となることと、全系の焦点距離の変化に対して、 $f_A$  と  $\beta_F$  の変化も調整できる有利さがある。

### 3.2 フォーカシングレンズ群が2群の場合

2群のときも1群のときと同様に(11)式と(12)式の  $P$  をズームリング時一定にすることを考える。(11)式と(12)式の  $P$  をそれぞれ対応させて次のように変形する。

$$f_1^2 = PK_2(1 - q/\beta_2^2) \quad (18)$$

$$q = 1 - \frac{K}{\beta_3^2} \left( 1 - \frac{1}{\beta_4^2} \right), \quad K = \frac{K_4}{K_2}$$

$$f_1^2 = PK_2(1 - r/\beta_2^2) \quad (19)$$

$$r = 1 - K(1 - 1/\beta_3^2), \quad K = K_3/K_2$$

ここで  $K_2$  は +1 または -1 である。(18)式と(19)式は(16)式にパラメータ  $q, r$  が導入されたものと考えられる。

(18)式と(19)式で、 $|f_1|$  と  $|\beta_2|$  がともに増倍する条件を考えると、それぞれ次の場合となる。

$$|\beta_2| > \sqrt{q}, \quad q > 0 \quad (20)$$

$$|\beta_2| > \sqrt{r}, \quad r > 0 \quad (21)$$

(20)式と(21)式の条件は  $K_2$  の値が +1 または -1 でも成立する。このことは、フォーカシングレンズ群の横倍率に関係なく、移動方向が決められることを意味している。2群のフォーカシングレンズ群のうち1群をその横倍率で決まる移動方向と逆に動かすことは(明らかに2群とも逆に移動できない)、このレンズ群がフォーカシング移動量を全焦点距離範囲にわたってほぼ一定にするための調整用として機能していることを示している。

(20)式と(21)式から、 $q, r$  の値が1より小さいとき、第2群の横倍率  $|\beta_2|$  は短焦点側で1より小さくできる。これによって、フォーカシングレンズ群が1群のときよりも、ズームリング時のフォーカシングレンズ群の移動量を小さくできると考えられる。

(18)式または(19)式に従うズームレンズは、 $f_1$  がズームリング時変化することから、それぞれ少なくとも5群

または4群構成となる。このような多群構成のズームレンズで、かつズームリング時横倍率  $\beta_3$  または  $\beta_4$  が変化する場合、厚肉解を求めることは困難な仕事である。 $\beta_3, \beta_4$  がズームリング時一定の場合は、ズームレンズはマスターレンズ部を有することになり、広角域を含む高変倍率ズームレンズとしては適切でない。しかし、ズームリング時  $|\beta_3|, |\beta_4|$  の値が非常に大きく、かつあまり変化しない場合は、有効な厚肉解の可能性があるとと思われる。

結局、フォーカシングレンズ群が2群の場合は、近軸解から設計するよりも、逆に、設計された多群ズームレンズに上記の原理が適用可能かどうかを検査し、可能ならば修正設計を行なう方法が適している。

## 4. む す び

前群繰出し方式ではなく、しかもほぼ同等な効果を有する新しいフォーカシング方式を、正負正の構成をもつズームレンズについて述べた。もちろん、他の構成のズームレンズでも適用できるが、ズームレンズ系はフォーカシングのためにある制約条件を満足しなければならない。

本方式は、ズームレンズが光学補正方式と機械補正方式とに分類されるように、ズームレンズのフォーカシング方式としては、“光学補正”とみなせるであろう。一方、“機械補正”の方式は、揺動部材やカム等によるものである<sup>6,7)</sup>。

本研究の原理とカム等での補正とが合わさったズームレンズのインターナルまたはリアフォーカシング方式は、上記制約条件が緩和された解として考えられる。また、オートフォーカス用ズームレンズにおいて、フォーカシング移動量の数倍程度の変化は大きな問題ではないと考えられるので、同様に、制約条件は緩和される。

最後に、本研究をまとめるにあたり、有益な助言をいただいた当社荻野修司課長と安国光雄主任に感謝いたします。

## 文 献

- 1) たとえば、  
小川良太、奥平定男、原原 悟：特開昭 54-30855。  
E. I. Betenski：特開昭 55-62419。  
石山唱蔵：特開昭 57-2014。  
荻野修司、升本久幸：特開昭 57-168209。
- 2) 石山唱蔵、坂野 誠、小島 忠：光学，10 (1981) 364
- 3) 田中一夫：応用物理，48, 10 (1979) 950。
- 4) 諏訪通美：特開昭 53-66223。
- 5) 柴谷 厚：特公昭 45-12715。
- 6) 上杉恭三：特開昭 50-122209。
- 7) 大貫光雄：特開昭 57-37307。