



## 新規なズームタイプの解析と設計

升本 久 幸

ミノルタカメラ(株)カメラ開発部 〒590 堺市大仙西町 3-91

(1989年4月7日受付, 1990年5月16日受理)

### Analyses of the Paraxial Solution on New Zoom Lens and Its Application to Actual Lens Design

Hisayuki MASUMOTO

Camera Engineering Division, Minolta Camera Co., Ltd.,  
3-91, Daisen-Nishimachi, Sakai, 590

(Received April 7, 1989; Accepted May 16, 1990)

In the design of a zoom lens, the fundamental requirements imposed upon the designer are short total length and low production cost of the lens. These two matters depend heavily on the selection of zoom lens type. Therefore, in order to realize the both requirements, a new zoom lens type named "Double Telephoto Zoom Type," has been introduced. This new zoom type composed of four components, refractive power of which are positive, negative, positive and negative respectively, are arranged from object side to image side. Through the analysis of paraxial relations and aberration characteristics among construction parameters in this zoom type, a series of formulas which can be used effectively in the course of design have been established. Some design examples for SLR Cameras are shown, one of which is compared with other traditional zoom lenses.

#### 1. はじめに

一眼レフカメラのオートフォーカス化に伴い、その交換レンズもズームレンズが主流になってきた。一眼レフカメラ用のズームレンズとしては、広角・標準領域のズーム比の小さい焦点距離領域を除いて、正成分からはじまるズームタイプが一般的である。このうち、古典的4成分ズームと呼ばれている二つの成分のみがズーミングで移動するタイプが一般的であったが、1980年代に入って、カム加工技術をはじめとする鏡胴技術の進歩によって、3成分以上が移動するズームタイプも可能となってきた。このタイプは多成分移動ズームと呼ばれ、まず標準領域で、ついで望遠領域で製品化され、小型化と高倍率化に貢献した<sup>1)</sup>。このズームタイプの特徴は、3成分以上が移動することから、変倍機能を複数の成分で分担できることと、ズーミングによる収差補正も総掛かりでできることである。しかしながら、このズームタイプの欠点は、古典的タイプと比べて製造精度が厳しく

なることである。したがって、多成分移動ズームの従来タイプの延長で小型化をはかると、とくに、望遠領域のズームレンズにおいては製造精度が急激に厳しくなるので、大幅な小型化には限界がある。また、低コスト化のためのレンズ枚数の削減も期待できない。

ズームレンズの設計においては、ズームタイプの選択が大きさや性能・コストを決める大きな要素である。ズームレンズの設計には、ズーム近軸解の決定とレンズ形状の決定がある。ここで重要な点は、前者のズーム近軸解によって、大きさのみならず、各ズーム成分が分担する収差補正の負担が決まることである。すなわち、ズーム近軸解の選択によって各ズーム成分に要求される大まかなレンズ枚数とその形状までも決まってしまう。一方、設計手法としては、大型コンピューターを用いた「自動設計」と呼ばれる手法によって、今日その高速化と合わせて、莫大な計算量を必要とするズームレンズの設計も比較的短時間に可能となった。しかしながら、この手法は初期形状が決定された後の収差補正にはきわめ

て有効であるが、新規なズームタイプの探索などには、理論的な解析等がどうしても必要となる。

本稿では、一眼レフカメラ用のズーム比2~3の望遠ズームレンズを前提に、新規に開発したズームタイプ(ダブルテレフォトズームタイプと呼ぶ)の特徴を述べ、そのズーム近軸解の求め方について解析する。解析に当っては実際の設計への適用を重視し、数多くの変数に対して大幅な近似と変数変換を行っている。さらに実際の設計への適用についても示す。

## 2. 新規なズームタイプの特徴

本タイプは、基本的に「正負正負」の屈折力によって構成され、第1成分と第4成分とがつねに移動し、第2成分と第3成分の少なくともどちらかが移動する新規なズームタイプである。Fig. 1 にその構成例を示す。本タイプを用いた結果、

- 全長が短い、
- レンズ枚数が少ないので低コストになる、
- 製造精度がゆるいので大量生産に有利になる、

といった特徴をもつズームレンズが可能となった<sup>2,3)</sup>。

本タイプを用いた場合のズーム近軸解の特徴は、次の4点である。

- 第2成分の屈折力が弱い。
- 最も像面側に強い負屈折力の成分を持つ。
- 各ズーム成分が薄肉系で構成される。
- ワイドからテレへのズーミングで、第1成分と第4成分とが像面側から被写体側へ移動する。

これらのうち、第1の特徴が最も重要で、従来のズームタイプでは、第2成分の横倍率を等倍(負)付近にすることによって、ズーミングによる移動量の少ない解になっていたのに対して、本タイプでは、3成分以上が移

動することを前提にして最適解を探索したため、第2成分の屈折力の弱いズーム近軸解が発見できた。すなわち、従来例では第2成分の負屈折力が第1成分の正屈折力に比べて3~5倍(絶対値)強い解になっていたのに対して、本タイプでは、ほぼ等しい解になっている。したがって、全長短縮がはかれるとともに、第2成分以後の収差補正の負担が軽くなったために、第3の特徴である各ズーム成分の薄肉化が可能となった。その結果、小型で、レンズ枚数も少ない、しかも製造精度のゆるいズームレンズが可能となった。さらに、第2の特徴とあわせて、ズーム全域でテレフォトタイプになることから大幅な小型化が可能となった。

## 3. ズーム近軸解の解析

### 3.1 新規なズームタイプの近軸配置の基本的関係

多成分移動ズームタイプの一般的なズーム近軸解の解析はきわめて複雑になる<sup>4)</sup>。本稿では、新規に開発したダブルテレフォトズームタイプに限定して、ズーム近軸解の解析を行う。解析は前章で述べたズームタイプの特徴から、とくに各ズーム成分が薄肉系により構成される特徴をいかした近似を適用することとし、さらに、収差特性との関係についても配慮する。

まずズーム近軸解の解析の前提となる近軸配置の基本的関係を明らかにする。Fig. 2 はその関係を表す模式図である。その前提条件はつぎのとおりである。

- 各ズーム成分は薄肉系とする。
- 正負正負の屈折力配置をもつ4成分ズームとする。
- ワイドからテレへのズーミングで、第1と第4成分とが像面側から被写体側へ一体で移動し、ワイド端で第1成分と第2成分が密着し、テレ端で

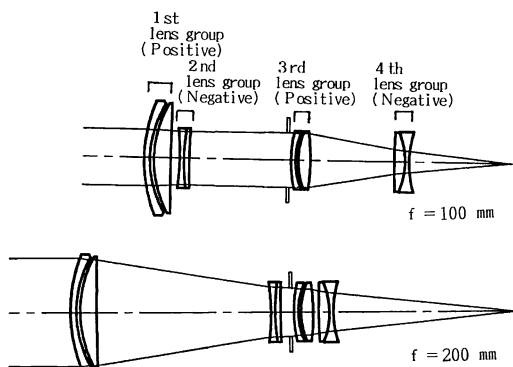


Fig. 1 Lens construction of "Double Telephoto" zoom type. SLR Zoom 100-200 mm.

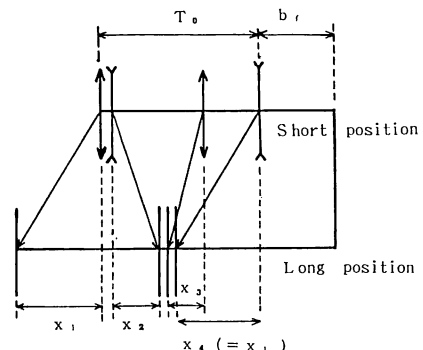


Fig. 2 Paraxial condition of "Double Telephoto" zoom type.

第2～第4成分が密着する。

- d) ズーム近軸解をワイド端とテレ端のみで規定する。

ここで各変数を以下のように設定する。ただしワイド端の焦点距離  $f_s$  を1に規格化するものとする。したがって、ズーム比を  $z$  とすると、テレ端の焦点距離  $f_L$  は  $z$  となる。

$\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ : 第1～第4成分の屈折力。

$$\phi_1 > 0, \quad \phi_2 < 0, \quad \phi_3 > 0, \quad \phi_4 < 0$$

$x_1, x_2, x_3$ : 第1～第3成分の移動量。ワイドからテレへのズームングで、像面側から被写体側への移動を正とする。

$$x_1 > 0, \quad x_1 > x_3 > x_2$$

第4成分の移動量は  $x_1$ 。

$b_f$ : ワイド端でのバックフォーカス値。

一眼レフカメラ用では、カメラ本体との境界条件から、バックフォーカス値の下限が制約される。

以上の前提条件と変数を用いると、ワイド端での焦点距離とバックフォーカス位置について次の関係が成立する。

$$\begin{aligned} &(\phi_1 + \phi_2) + \{1 - (x_3 - x_2)(\phi_1 + \phi_2)\} \phi_3 \\ &+ \{1 - (x_3 - x_2)(\phi_1 + \phi_2) - (x_1 - x_3)\{(\phi_1 + \phi_2) + \phi_3 \\ &- (x_3 - x_2)(\phi_1 + \phi_2)\phi_3\} \} \phi_4 = 1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$1 - (x_3 - x_2)(\phi_1 + \phi_2) - (x_1 - x_3)\{(\phi_1 + \phi_2) + \phi_3 - (x_3 - x_2)(\phi_1 + \phi_2)\phi_3\} = b_f \quad (2)$$

一方、テレ端での焦点距離とバックフォーカス位置については次が成立する。

$$\phi_1 + (\phi_2 + \phi_3 + \phi_4) - (x_1 - x_2)\phi_1(\phi_2 + \phi_3 + \phi_4) = 1/z \quad (3)$$

$$1 - (x_1 - x_2)\phi_1 = (x_1 + b_f)/z \quad (4)$$

### 3.2 ズーム近軸解決定のための変数変換

前節の(1)～(4)式において、ズームレンズとしての仕様(焦点距離領域)が決定されると、 $z$  と  $b_f$  は定数として与えられる。近軸解として決定しなければならない変数は全部で7個であるが、それらを制約する条件が上記(1)～(4)式であるから、3個が残された自由度となる。ところで、 $\phi_1$  は通常のズームレンズの場合、 $\phi_1 \doteq 1/\sqrt{f_L f_s}$  という値をとるから<sup>\*1</sup>、実際に残された自

由度は2となる。そこで、その二つの自由度を制約する2個の変数を新たにパラメータとして設定すると、すべての変数の値が求まり、ズーム近軸解が決定できることになる。

まず、パラメータとしては、ズームレンズの設計要件(設計の際にどんな基準でズーム近軸解の選択をするのかの要件)を考えて、その要件を満たすのに見通しのよい物理量を選ぶ。次に、そのパラメータを用いて、最終的なズーム近軸解( $\phi_1 \sim \phi_4, x_1 \sim x_3$ )を決定するのに必要な一連の関係を、変数変換を行うことによって導出する。

ズームレンズの製品化においては、結像性能を維持しながら、小型で低コストな設計が要求される。したがって、ズーム近軸解としては、次の二つの要件が必要である。一つは、大きさを規定する設計要件で、もう一つは、ズーム全域の性能を維持するための各ズーム成分の収差負担を規定する設計要件である。ここで、前者を全長条件と呼び、パラメータとして  $\gamma$  を、後者を収差負担(補正)要件と呼び、パラメータとして  $\alpha$  を以下のように設定する。

$$\gamma = -\{1 + (\phi_2 + \phi_3 + \phi_4)/\phi_1\} \quad (5)$$

$$\alpha = -(\phi_1 + \phi_2)/\phi_1 = -1/\beta_{2s} \quad (6)$$

ここで、 $\beta_{2s}$  はワイド端での第2成分の横倍率である。

これらのうち、 $\gamma$  はテレ端での前後群の屈折力比(Fig.2 参照)に関係する物理量で、ズームレンズの小型化を見通すのに都合の良いパラメータである。また、 $\alpha$  はワイド端での第2成分の結像関係を示し、さらに第2成分以後の結像関係(第2章参照)にも関係する物理量で、ズームレンズの収差負担を見通すのに都合の良いパラメータである。

以上の二つのパラメータをもとに、(1)～(4)式からズーム近軸解を求める手順を考察する。まず、 $\phi_2, \phi_3, \phi_4, x_2, x_3$  を次のように変数変換し、(1)～(4)式に代入し、 $x_1, \beta, l, m$  を求める。

ここで、 $\beta$  は第1成分の屈折力に対する第3成分の屈折力比を、 $l$  は第1成分の移動量に対する第2成分の移動量比を、 $m$  は第1成分の移動量に対する第3成分の移動量比をおのおの表す変数である。

$$\phi_2 = -(1 + \alpha)\phi_1 \quad (7)$$

$$\phi_3 = \beta\phi_1 \quad (8)$$

$$\phi_4 = (\alpha - \beta - \gamma)\phi_1 \quad (9)$$

$$x_2 = lx_1 \quad (10)$$

$$x_3 = mx_1 \quad (11)$$

このとき、 $\phi_1 > 0, \phi_2 < 0, \phi_3 > 0, \phi_4 < 0$  から  $\alpha > -1$ ,

\*1 正成分からはじまり第1成分でフォーカシングするズームレンズにおいては、第1成分の屈折力はフォーカシング移動量とフォーカシングに伴う収差変動のバランスから、通常経験則によって、上記の近傍の値をとる。最近の小型化を重視した設計では、1.4倍を越える場合もある。

$\beta > 0$ ,  $\alpha - \beta - \gamma < 0$  となり,  $x_1 > x_3 > x_2$  から  $1 > m > l$  となる。

(7)~(11)式の変数を用いて, (1)~(4)式を変換すると次のようになる。

$$1 + \{\alpha + b_l(\gamma - \alpha)\} \phi_1 = \{1 - b_l + (L - M)\alpha\} \phi_1 \beta \quad (12)$$

$$1 - b_l + L\alpha = \{1 + (L - M)\alpha\} M\beta \quad (13)$$

$$-\gamma\phi_1 + L\phi_1(1 + \gamma) = 1/z \quad (14)$$

$$1 - L = (x_1 + b_l)/z \quad (15)$$

ここで,

$$(1 - m)x_1\phi_1 = M \quad (16)$$

$$(1 - l)x_1\phi_1 = L \quad (17)$$

$$0 < M < L$$

(12)~(15)式を解くと,  $x_1$ ,  $\beta$ ,  $L$ ,  $M$  が以下のようにもとまる。

$$x_1 = (z - 1/\phi_1)/(1 + \gamma) - b_l \quad (18)$$

$$L = (1 + \gamma z \phi_1) / \{(1 + \gamma)z \phi_1\} \quad (19)$$

$$M = \{B \pm (B^2 - 4\alpha C)^{1/2}\} / 2\alpha \quad (20)$$

$\alpha \neq 0$  のとき

複号は,  $0 < M < L$  を満足するほうをとる。

$$B = (A_1\phi_1\alpha/A_2) + 1 + L\alpha \quad (21)$$

$$C = A_1^2\phi_1/A_2 \quad (22)$$

$$A_1 = 1 - b_l + L\alpha \quad (23)$$

$$A_2 = 1 + \{b_l\gamma + (1 - b_l)\alpha\} \phi_1 \quad (24)$$

$$M = \{(1 - b_l)^2\phi_1\} / \{(1 + b_l\gamma)\phi_1\} \quad (25)$$

$\alpha = 0$  のとき

$$\beta = \frac{1 + \{\alpha + b_l(\gamma - \alpha)\} \phi_1}{\{(1 - b_l) + (L - M)\alpha\} \phi_1} \quad (26)$$

以上により, (18)~(26)式を(7)~(11), (16), (17)式に代入すると, パラメータ  $\alpha$ ,  $\gamma$  を用いて, ズーム近軸解が以下のように決定される。

まず, 屈折力  $\phi_2 \sim \phi_4$  は以下のようにして求められる。

(i)  $\alpha \neq 0$  のとき

$$\phi_2 = -(1 + \alpha)\phi_1 \quad (27)$$

$$\phi_3 = \frac{1 + \{b_l\gamma + (1 - b_l)\alpha\} \phi_1}{(1 - b_l) + (L - M)\alpha} \quad (28)$$

$$\phi_4 = \frac{1 + \{\gamma + \gamma(L - M)\alpha - (L - M)\alpha^2\} \phi_1}{(1 - b_l) + (L - M)\alpha} \quad (29)$$

(ii)  $\alpha = 0$  のとき

$$\phi_2 = -\phi_1 \quad (30)$$

$$\phi_3 = (1 + b_l\gamma\phi_1)/(1 - b_l) \quad (31)$$

$$\phi_4 = -(1 + \gamma\phi_1)/(1 - b_l) \quad (32)$$

また, 各成分の配置関係  $x_1 \sim x_3$  は以下のようにして求

められる。

$$x_1 = (z - 1/\phi_1)/(1 + \gamma) - b_l \quad (18)$$

$$x_2 = \left[ 1 - \frac{\gamma z \phi_1 + 1}{\gamma z \phi_1 \{z \phi_1 - 1 - (1 + \gamma)b_l \phi_1\}} \right] x_1 \quad (33)$$

$$x_3 = (1 - M/x_1\phi_1)x_1 \quad (34)$$

### 3.3 ズーム近軸解選択のための設計要件と評価量

前節で選んだ二つのパラメータ  $\gamma$ ,  $\alpha$  をもとに実際に最適なズーム近軸解を選択する過程では, 前節で述べた二つの設計要件, すなわち全長条件と収差負担条件への適否を判断するための評価量が必要である。ここでは, そうした設計要件とその評価量について述べる。

#### 3.3.1 全長条件の評価量

多成分移動ズームタイプでは, 最短状態での全長だけでは小型化を判定できず, 主に第1成分の移動量との関係と併用して評価しなければならない。したがって以後, 前者を最短長  $T_0 (= x_1 - x_2)$ , 後者を主に設計上の制約からとらえて, 鏡胴条件 ( $K_0$ ) と呼ぶ。さらに, 後者は第1成分の移動量単独の値よりも  $T_0$  で規格化した値のほうが実情に合いやすいので,  $K_0 = x_1/T_0$  で定義をする。 $T_0$ ,  $K_0$  は前節の(18), (33)式から以下のように表される。

$$T_0 = \frac{1 + \gamma z \phi_1}{(1 + \gamma)z \phi_1^2} \quad (35)$$

$$K_0 = \frac{\{z - 1/\phi_1 - (1 + \gamma)b_l\} z \phi_1^2}{1 + \gamma z \phi_1} \quad (36)$$

(35), (36)式で決まる  $T_0$ ,  $K_0$  を評価量として併用することにより, パラメータ  $\gamma$  の全長条件に与える影響を的確に評価できる。

#### 3.3.2 収差負担(補正)条件の評価量

多成分移動ズームタイプでは, 従来の古典的4成分ズームタイプと異なり各成分の収差補正が明確に分担されてなく, 特定の量だけでその良否を判断することはできない。定性的には各ズーム成分の屈折力の関係(屈折力の絶対値の大小), とくに第2成分の負屈折力の大小で判断できる。しかしながら, より定量的に評価するには山路の特性行列<sup>9)</sup>が有効で, 次節では具体的に簡略化した形式の特性行列を適用した結果を示すことにする。収差補正条件を判断する簡単な評価量としては第2~第4成分の屈折力を第1成分の屈折力で規格化した,  $\phi_2/\phi_1$ ,  $\phi_3/\phi_1$ ,  $\phi_4/\phi_1$  を用いれば良い。

以上から, ズームレンズの仕様が決めれば  $z$  と  $b_l$  が定数として与えられ, また  $\phi_1$  も定められるから, (35), (37)式的全長条件を手がかりにまず  $\gamma$  の値が決まる。次

にパラメータ  $\alpha$  の値を与えると、(27)~(32)式により  $\phi_2 \sim \phi_4$  が求められるから、収差補正条件の大まかな判断ができ、また必要ならば、さらに(18), (33), (34)式から  $x_1 \sim x_3$  を求めて特性行列により収差補正条件を総合的に評価することもでき、 $\alpha$  の値も決まる。

3.4 焦点距離領域と最適なズーム近軸解

一眼レフカメラ用望遠ズームレンズとして、ダブルテレフォトズームタイプを設計するに当たって、焦点距離領域に応じて、どのようなズーム近軸解を採用するかについて述べる。

ズーム近軸解の探索は、前節の二つのパラメータ  $\gamma$ ,  $\alpha$  をもとに行う。Fig. 3, 4 に全長条件とパラメータ  $\gamma$  との関係および収差補正条件とパラメータ  $\alpha$  との関係を示す。その場合、全長条件としては最短長  $T_0$  と鏡胴条件  $K_0$  を、また収差補正条件としては第2~第4成分の屈折力と第1成分の屈折力の比を評価量として用いる。

3.4.1 ワイド端の焦点距離とズーム近軸解

一眼レフカメラ用のズームレンズにはバックフォーカス値に制約があることから(実寸で約40mm)、ワイド端の焦点距離は直接  $b_f$  の値に関係してくる。たとえば、ワイド端の焦点距離が80mmの場合は、ワイド端の焦点距離を1に規格化していることから、 $b_f \doteq 0.5$  と

なり、ワイド端の焦点距離が135mmの場合は、 $b_f \doteq 0.3$  となる。ワイド端の焦点距離とズーム近軸解の関係を80mmと135mmの場合を例として示したのがFig. 3である。ここでは、 $z=2$ ,  $\phi_1=0.77$  としている。Fig. 3においては、いずれも  $\gamma=0$  としている。ワイド端の焦点距離がより短くなると、第3, 第4成分の屈折力が相対的に強くなり、収差補正条件が厳しくなることがわかる。

3.4.2 ズーム比とズーム近軸解

ズーム比とズーム近軸解の関係を2倍ズームと3倍ズームを例として示したのがFig. 4である。ここでは、 $b_f=0.4$ ,  $\phi_1=0.77$  としている。Fig. 4において、すべて  $\gamma=0$  とすると、ズーム比が大きくなるにつれて、鏡胴条件  $K_0$  が大幅に大きくなるので、 $z=2$  のときは  $\gamma=0$ ,  $z=3$  のときは  $\gamma=0.5$  とする。このときは  $K_0$  がほぼ一定で、最短長  $T_0$  が徐々に大きくなる。この場合も、ズーム比が大きくなると、第3, 第4成分の屈折力が相対的に強くなり、収差補正条件が厳しくなることがわかる。

4. 設計への適用例

4.1 ズーム近軸解と大きさおよび収差特性

ダブルテレフォトズームタイプのズーム近軸解と全長

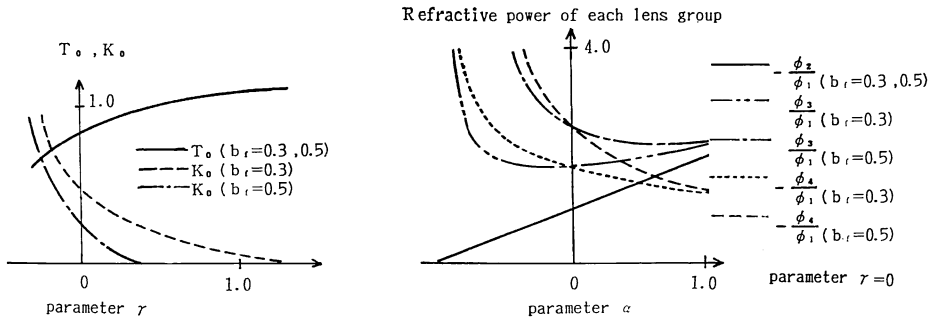


Fig. 3 Relation between focal length of wide position and zoom paraxial condition.

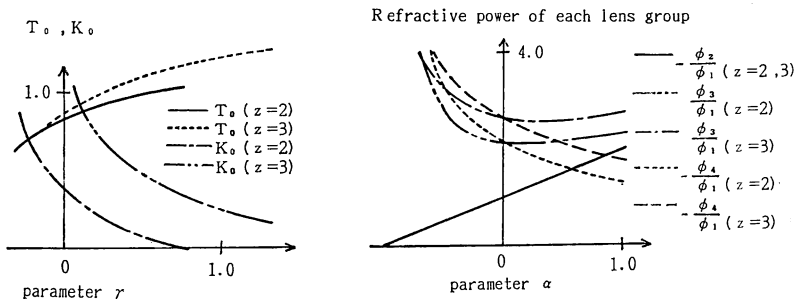


Fig. 4 Relation between zoom ratio and zoom paraxial condition.

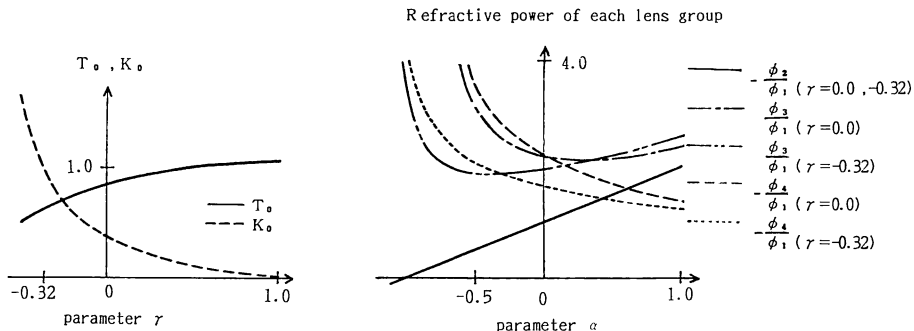


Fig. 5 Relation between total length condition and refractive power of each lens group. SLR Zoom 100-200 mm.

Table 1 Zoom paraxial solution.

Parameter		Refractive power of each lens group ( $f_s=1, f_L=z$ )				Paraxial distance of each lens group		
$\gamma$	$\alpha$	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_3$	$\phi_4$	$e_{12}$	$e_{23}$	$e_{34}$
0.0	-0.5	0.769	-0.385	2.276	-2.661	S) 0	0.68	0.16
						L) 0.85	0	0
0.0	0.0	0.769	-0.769	1.667	-1.667	S) 0	0.49	0.36
						L) 0.85	0	0
0.0	1.0	0.769	-1.538	1.805	-1.036	S) 0	0.27	0.57
						L) 0.85	0	0
-0.32	-0.5	0.769	-0.385	1.431	-1.569	S) 0	0.34	0.29
						L) 0.63	0	0
-0.32	0.0	0.769	-0.769	1.502	-1.255	S) 0	0.23	0.40
						L) 0.63	0	0
-0.32	1.0	0.769	-1.538	1.959	-0.942	S) 0	0.13	0.51
						L) 0.63	0	0

S: short position, L: long position.

条件および収差特性 (収差補正条件) との関係をもとに比較する。具体的な仕様としては、一眼レフカメラ用望遠ズームレンズ 100-200 mm を想定する。したがって、変数を  $z=2, b_l=0.4, \phi_1=0.77$  とする。

以上の変数を (35), (36) 式に入れて、 $\gamma$  と全長条件の関係を実算した結果を Fig. 5 の左側の図に示す。収差特性については、次に示すように鏡筒条件  $K_0$  を相対的に重視した場合 (A) と、最短長  $T_0$  を相対的に重視した場合 (B) の二つの場合について計算した。

A)  $K_0=0.29, T_0=0.85$  ( $\gamma=0.0$ )

B)  $K_0=1.0, T_0=0.63$  ( $\gamma=-0.32$ )

おのおの場合について、 $\alpha$  の値を (27) ~ (32) 式に入れて、 $\phi_2/\phi_1, \phi_3/\phi_1, \phi_4/\phi_1$  を計算した結果を示したのが Fig. 5 の右側の図である。

次に、後者の図の  $\alpha = -0.5, 0, 1.0$  の3点に対応するズーム近軸解について、上記の (A), (B) 二つの場合のもう少し詳細な収差特性の比較を行ってみる。まず、おのおのズーム近軸解の具体的な数値を整理して示したのが Table 1, また、各ズーム近軸解の収差補正条件を比較するために、先の簡略化した特性行列を計算した結果\*2を示したのが Table 2 である。

\*2 ズームレンズにおいて、その近軸解のもとで、各ズーム成分が負担する収差量 (規格化された条件下で示された収差量) を各ポジション (S端, M, L端) ごとの実際の収差量に変換するための行列 (収差量を3次の収差係数で表したとき7行7列の行列) で、特性行列と呼ぶ、さらに、各ズーム成分が薄肉密着系で近似できる場合は2行5列の行列となり、簡略化された形式となる。一方、ズームレンズの設計においては、ズーミングによる収差変動が問題となるので、本稿では、各ズーム成分の収差変動で表現する。(定数項は省略)

**Table 2** Paraxial zoom solution and characteristics.

Characteristic matrix (Aberration difference between short position and long position)							
$\gamma=0.0$		$\alpha=-0.5$		$\alpha=0.0$		$\alpha=1.0$	
		I <sub>o</sub>	II <sub>o</sub>	I <sub>o</sub>	II <sub>o</sub>	I <sub>o</sub>	II <sub>o</sub>
1st lens group	I	6.82	0	6.82	0	6.82	0
	II	-3.96	1.77	-4.16	1.77	-4.28	1.77
	III	2.26	-1.76	2.54	-2.28	2.62	-2.58
	V	-1.24	1.07	-1.54	2.16	-1.59	2.49
	I <sup>s</sup>	0.63	-0.22	0.93	-1.80	0.96	-2.04
2nd lens group	I	-0.04	0.14	-0.34	0.56	-2.76	2.27
	II	0.05	-0.49	0.22	-1.18	0.82	-2.84
	III	-0.04	0.66	-0.10	1.00	-0.18	1.43
	V	0.04	-0.73	0.05	-0.62	0.04	-0.44
	I <sup>s</sup>	-0.04	0.79	-0.02	0.37	0.00	0.12
3rd lens group	I	-0.66	-5.82	-3.51	-3.38	-11.18	-19.81
	II	0	-0.28	0	-1.41	0	-3.17
	III	0	0	0	0	0	0
	V	0	0	0	0	0	0
	I <sup>s</sup>	0	0	0	0	0	0
4th lens group	I	4.05	-24.11	0.99	-7.09	0.23	-2.15
	II	-0.26	4.41	-0.10	1.98	-0.03	0.81
	III	-0.14	-0.10	-0.09	0.16	-0.03	0.13
	V	-0.08	-0.40	-0.08	-0.21	-0.04	-0.07
	I <sup>s</sup>	-0.04	-0.42	-0.07	-0.51	-0.05	-0.37

$\gamma=-0.32$		$\alpha=-0.5$		$\alpha=0.0$		$\alpha=1.0$	
		I <sub>o</sub>	II <sub>o</sub>	I <sub>o</sub>	II <sub>o</sub>	I <sub>o</sub>	II <sub>o</sub>
1st lens group	I	6.82	0	6.82	0	6.82	0
	II	-2.04	1.77	-2.11	1.77	-2.17	1.77
	III	0.60	-0.97	0.65	-1.17	0.67	-1.13
	V	-0.17	0.38	-0.20	0.56	-0.20	0.63
	I <sup>s</sup>	0.05	-0.12	0.06	-0.24	0.06	-0.26
2nd lens group	I	0.00	-0.54	0.05	-2.16	0.47	-8.67
	II	0.02	-0.17	0.10	-0.38	0.41	-0.68
	III	0.00	0.18	-0.02	0.36	-0.04	0.63
	V	0.00	-0.09	0.00	-0.11	0.00	-0.10
	I <sup>s</sup>	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.10
3rd lens group	I	1.64	-8.18	0.44	-7.37	-2.35	-14.74
	II	0	0.63	0	0.14	0	-0.53
	III	0	0	0	0	0	0
	V	0	0	0	0	0	0
	I <sup>s</sup>	0	0	0	0	0	0
4th lens group	I	4.26	-27.21	2.18	-15.23	0.92	-7.35
	II	-0.08	3.07	-0.05	2.02	-0.02	1.16
	III	-0.06	0.05	-0.05	0.10	-0.02	0.08
	V	-0.05	-0.22	-0.05	-0.15	-0.03	-0.08
	I <sup>s</sup>	-0.04	-0.41	-0.05	-0.40	-0.03	-0.31

Aperture diaphragm is located in the 3rd lens group. I : spherical aberration, II : coma, III : astigmatism, V : distortion, I<sup>s</sup> : pupil spherical aberration.

Table 1, 2 から, 以下のことがわかる.

(1) Aの場合, 球面収差(特性行列の第1行)に注目すると,  $\alpha=0.0$  のときが最もバランスが良く,  $\alpha=-0.5$  のときは第4成分の,  $\alpha=1.0$  のときは第3成分の収差変動が大きくなる. 非点収差(特性行列の第3行)に注目すると, 第1, 第2成分の収差変動が  $\alpha=-0.5, 0.0, 1.0$  の順に大きくなるが, 球面収差に比べて十分小さい値である. したがって, この場合  $\alpha=0.0$  の解が収差特性上最もバランスの良い解になる.

(2) Bの場合,  $\alpha=-0.5, 0.0, 1.0$  のときの相互の関係はAの場合と同様であるが, Aの場合と比較すると, 球面収差変動は相対的に大きくなり, 非点収差変動は相対的に小さくなる.

(3) (1)(2)から(A)の場合と(B)の場合を比較すると, (A)の場合は開放F値(口径)に依存する球面収差変動が相対的に小さいので, 開放F値の明るい仕様では, よりAの場合の解が有利で, (B)の場合は画角により大きく依存する非点収差変動が相対的に小さいので, 画角の広い(ワイド端の焦点距離の短い), ズーム比の大きい仕様では, よりBの場合の解が有利となる.

#### 4.2 ダブルテレフォトズームタイプの設計例

第2章, Fig.1の構成例は, 前節の検討結果をもとに設計した例で, Aの場合( $r \approx 0.0$ )で  $\alpha \approx 0.0$  のときのズーム近軸解に相当する. 仕様は, 一眼レフカメラ用の望遠ズームレンズ 100-200/4.5 である.

Fig. 6は同様の 100-300/4.5-5.6の構成図で, ダブルテレフォトズームタイプの特徴が最も良くでている設計例で, レンズの大きさ, 枚数等が比較できるようにほぼ同仕様の従来タイプの例も同時に示している.

### 5. ま と め

新規に開発したズームタイプ(ダブルテレフォトズームタイプ)のズーム近軸解と収差特性を解析し, 一眼レフカメラ用望遠ズームレンズにおける本タイプの特徴を明確にした. さらに, 小型でかつ低コストなズームレンズ群の設計例も示した.

本稿では, 一眼レフカメラ用望遠ズームレンズに限定して述べてきたが, 本タイプは一眼レフカメラ用標準

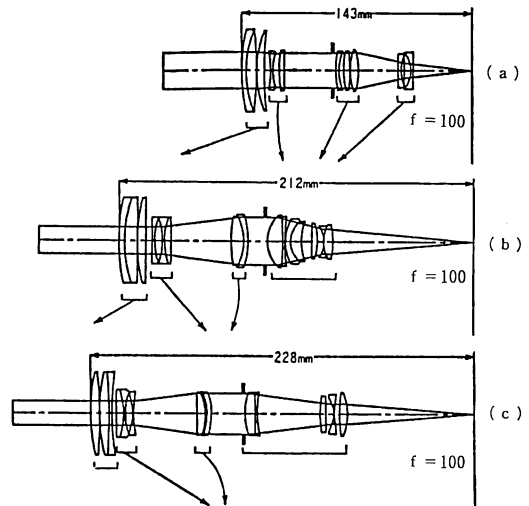


Fig. 6 Lens construction of "Double Telephoto" zoom type (a) and previous types (b) and (c). SLR Zoom 100-300 mm. (b) is typical multiple movable lens group (JP 60-114814). (c) is typical traditional 4-group zoom type (Minolta New MD Lens).

ズームレンズ<sup>6)</sup>, レンズシャッターカメラ用標準ズームレンズ<sup>7)</sup>などへの展開も考えられる.

なお, 本研究において, 解析の助言と指導をいただいた当社の得丸課長と研究の機会を与えていただいた荻野課長に感謝します. また, 設計例の一部を担当していただいた小島氏, 福島氏にも感謝します.

### 文 献

- 1) 得丸 祥: "最近の撮影用ズームレンズ", 光学 16(1987) 324-330.
- 2) 升本久幸, 小島亜矢子, 福島 省: "ダブルテレフォトズームタイプ", ミノルタテクノレポート No. 6 (1989) 26-36.
- 3) 升本久幸: "[ダブルテレフォトズームタイプ]と各種ズームタイプの特徴比較", 光技術コンタクト, 27 (1989) 465-472.
- 4) 田中一夫: "機械補正式ズームレンズの分類および新規タイプの近軸解析", 光学 10 (1981) 356-363.
- 5) 山路敬三: "ズームレンズの光学設計に関する研究", キヤノン研究報告, No. 3 (1964).
- 6) 升本久幸: 特開昭 61-56315.
- 7) 升本久幸: 特開昭 60-57814.