

## LED 照明ノーツ 29

## レンズを使う 16

## ＜近軸理論によるピント調整によるレンズ移動量を

## 実際に計算してみよう＞

前回は、具体的なダブルレットレンズにおける焦点距離と主点位置等の近軸理論に基づくレンズの最も大切な基本量の計算について考えた。煩雑な計算のように見えるが実は近軸光線追跡式の単純な繰り返しにより成り立っていた。今回は近軸光線追跡式と同じところから導かれるレンズメーカーの式を用いて、異なる距離にある被写体の写真を撮影するために、前回計算した様なレンズの基本エレメントをどの様に配置し、或いはどの様に動かせば良いかについて考え、具体的に計算する。

1. 薄肉系によるピント調整量（繰り出し量）を計算する。

今回の計算の基本となる本連載第 16 回の(4)式、レンズメーカーの式は、

$$\frac{n'}{b} - \frac{n}{a} = \frac{n'}{f'} \quad (16-4)$$

であった。ここに物体（被写体）のある空間の、そして像のある空間の媒質の屈折率をそれぞれ  $n, n'$ 、物体からレンズまでの距離を  $a$ 、レンズから像までの距離を  $b$  としている。 $f'$  はレンズの焦点距離である。本連載第 18 回において触れたように、このレンズメーカーの式から物体位置  $a$  が変化すれば、ピントの合っている画像を得るためには、レンズと像の間の距離  $b$  も変化しなければならない事が分かる。第 18 回図 5 にも有る様に、(16-4) 式から、物体が無限遠からレンズに近づくのに従いレンズから像の距離  $b$  は大きくなって行く。そのような事情からピント調整を、繰り出す、という言い方をする。第 18 回の物体、像位置の計算における様に、レンズ系をごく薄く考えれば、一つの繰り出し方法しか無いが、実際のレンズには厚みがあり、また複数のレンズで構成されることも一般的であり、この繰り出しの手法はいくつか存在する。ここでは、代表的な繰り出し方式を例にとり、(16-4)式を用いてピント調整のためのレンズの移動量について計算させていただくこととする。

### 1.1 全体繰り出しの場合 (焦点距離 : $f'$ )

レンズ全体を一括して動かすピント調整のための最も一般的な手法である。後述の手法と異なりレンズ構成自体には変化が起こらないので、焦点距離の変化は起こらない。

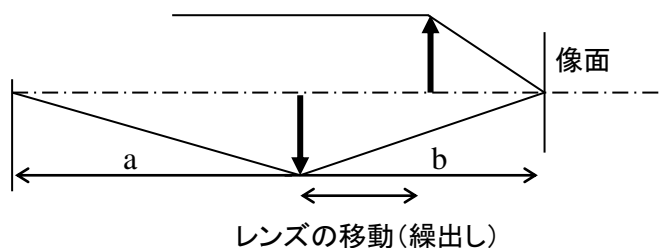


図1 全体繰り出し

図1の様に、無限倍率の場合 ( $a = \infty$ ) と、ピントを合わせるべき有限倍率の場合を光軸挟んで上下に並べて描けば、レンズメーカーの式 (16-4) より、空气中にレンズが存在し  $n = n' = 1$  として、

$$b = \frac{af'}{a + f'} \quad (1)$$

従って、倍率無限の場合の  $b$  は焦点距離  $f'$  であるから、

$$\text{移動量 } \Delta = f' - b \quad (2)$$

となる。

### 1.2 前玉繰り出しの場合

レンズが複数枚で構成されているとき、図2にある様なピント調整も可能になる。一番前の前玉レンズ (或いは群) のみを移動させて調整できる。無限倍率時の第一群が作る像を、それ以降に続くレンズ群で引き継ぐと考えれば、それぞれの部分で(16-4)式の関係が成立しているはずである。従って、有限倍率の場合も、無限の場合の第一群による像位置  $F1$  に、繰り出した第一群の像を持ってくれば、後段の光学系は不変であるので同一の像面にピントが合う (合焦する) 事になる。

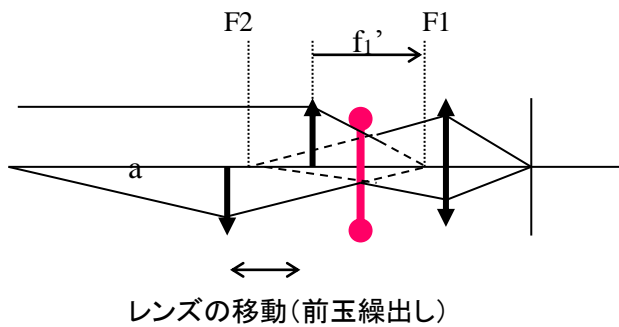


図2 前玉繰り出し 黒矢印は正の、赤丸は負の焦点距離のレンズ群を表す。

従って、上の全体繰り出し量の計算における  $f'$  を上図の第一薄肉レンズの焦点距離  $f'_1$  に置き換えれば同様にして移動量  $\Delta$  が得られる。

### 1.3 後玉移動方式の場合

当然の成り行きとして、前玉で可能なら、後ろにある後玉でもピント調整を行おう、ということになる。この場合、勿論可能であるが計算はやや複雑になる。

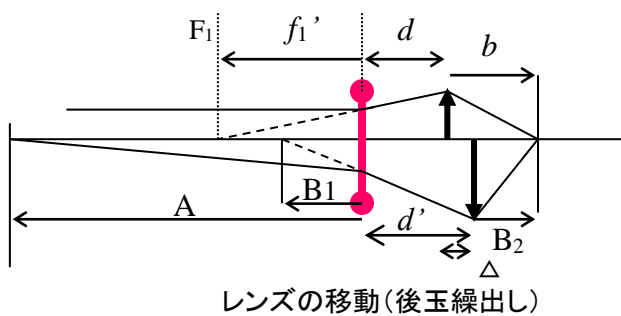


図3 後玉繰り出し

A を前群から物体（被写体）までの距離、B1 を前群による空中像位置までの距離とすれば、  
前群の焦点距離を  $f'_1$  として、やはりレンズメーカーの式より、

$$\frac{1}{B_1} - \frac{1}{A} = \frac{1}{f'_1}$$

従って、

$$B_1 = \frac{Af'_1}{A+f'_1}$$

である。また、有限倍率時の後群から像までの距離を  $B_2$ 、前群、後群の間隔を  $d'$ 、後群焦点距離を  $f'_2$  とすれば、同様に、

$$\frac{1}{B_2} - \frac{1}{B_1 - d'} = \frac{1}{f'_2}$$

従って、

$$B_2 = \frac{(B_1 - d')f'_2}{(B_1 - d') + f'_2}$$

となる。この式を  $d'$  について解いていくと、

$$d' = \frac{B_1 f'_2 - B_2 (f'_2 + B_1)}{f'_2 - B_2} \quad (3)$$

また、第1レンズから像面までの距離は一定でなければならないので、無限倍時のバックフォーカスを  $b$ 、前群、後群の間隔を  $d$  として、

$$d + b = d' + B_2$$

従って、繰り出しに際しての移動量を、

$$\Delta = d - d'$$

として、

$$B_2 = d + b - d' = b + \Delta \quad (4)$$

この(4)式を(3)式に代入して結果を得る。

$$d - \Delta = \frac{B_1 f'_2 - (b + \Delta)(f'_2 + B_1)}{f'_2 - (b + \Delta)} \quad (5)$$

(5)式は $\Delta$ についての2次方程式となり、

$$\Delta^2 + \Delta(b - d + B_1) + f'_2 d - b d - B_1 f'_2 + b f'_2 + d B_1 = 0$$

これを根の方程式、

$$\alpha x^2 + \beta x + \gamma = 0 \quad \text{の場合の} \quad x = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha}$$

を利用して解けば良い。かなり煩雑な様であるが、レンズの近軸構成において良く見受けられる作業である。

なお±の符号については、根の方程式の解にどちらかが第1レンズの前に第2レンズが来てしまう実現不可能な解が含まれるため、その実現性を確認して選択する。こうした解が2つ存在することは、たとえば単レンズによる同じ共役長の光学系配置は、横倍率  $b/a$  の時と  $a/b$  の時の2種類存在するのを考えれば分かりやすい。

又、後玉移動により全体の近軸量（全体の焦点距離、主点位置等）も変化する事になるがこの場合にも、（前玉繰り出しの場合も同様であるが） $\phi_1 = 1/f'_1$ 、 $\phi_2 = 1/f'_2$ 、 $d'$  の値を用いて、2枚の薄肉系について新たな近軸追跡により  $\alpha'_2$ 、 $h_2$  を得てそこから計算すれば良い。

こうした部分的な繰り出しは、レンズ構成、そして焦点距離も変化する性能的に、あるいは工作精度的にも不利な傾向は否めないが、繰り出しの運動量の軽減には大いに役に立つ。例えば、望遠レンズなどの大きく重いレンズを素早い合焦のために全体的に動かすことは合焦手法としては非常に不合理である。

因みにこうした場合には、ここでは触れなかったが、レンズ群において両端ではなく、中間の群を動かす手法も一般的に用いられる。

## 2. 参考文献

- 1) 小倉磐夫:現代のカメラとレンズ技術、新装版(写真工業出版社、東京、1995),p 86
- 2) 小倉敏布:写真レンズの基礎と発展(朝日ソノラマ、東京、1995),p 30.
- 3) 高野栄一:レンズデザインガイド(写真工業出版社、東京、1993),p 24
- 4) 中川治平:図解雑学、レンズのしくみ(ナツメ社、東京、2010),p 116
- 5) 中村壮一:中村壮一、藤江大二郎編、基礎からわかる光学部品  
(オプトロニクス社、東京、2006),p 17.

執筆者：牛山 善太

博士（工学）

元東海大学工学部光・画像工学科（レンズ設計）非常勤講師

(株)タイコ 代表取締役

(株)オプティカルソリューションズ 顧問

提供：

**株式会社オプティカルソリューションズ**

TEL: **03-5833-1332**

Mail: [info@osc-japan.com](mailto:info@osc-japan.com)

Web: <http://www.osc-japan.com>

〒101-0032

東京都千代田区岩本町 2-15-8 MAS 三田ビル 3 階