LED 照明ノーツ　31

レンズを使う 18

＜光学補正式ズームの近軸計算＞

はじめに

　前回はズームレンズの基本的な原理と、簡単な近軸構造計算について解説させていただいた。前回考えたのは 4 群アフォーカル系という言わばもっとも形式的に洗練し、古典的に完成しているタイプである（決して最先端のズームタイプと言うことでは無いが）。今回はこれとは逆に最も古い、原始的なズームタイプについて説明させていただきたい。また、近軸計算の一応の締めくくりとして、その構造を近軸計算で考えさせて戴く。

1.　光学補正式ズームとは

図 1 の様な光学系を考える。

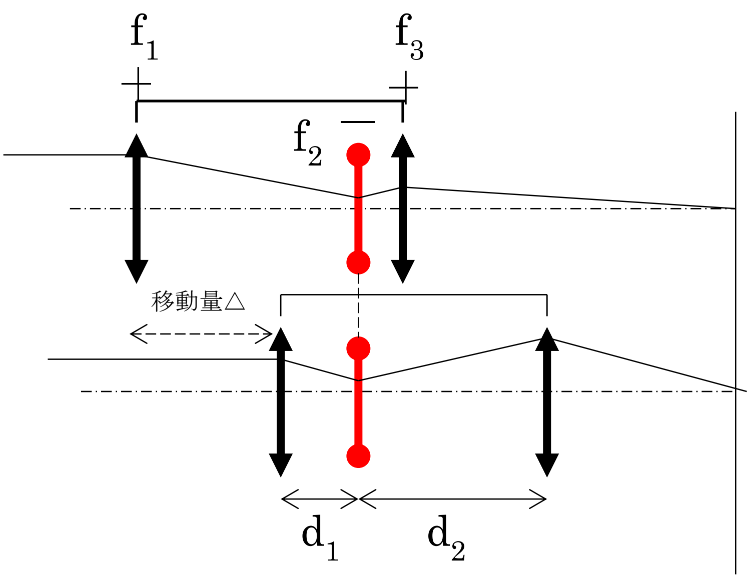

図 1　　光学補正式ズーム

焦点距離がそれぞれ、f_1,f_2 そして f_3 である 1 群 2 群 3 群として正、負、正のレンズがあり、正の 1 群と 3 群が同じ動きをするとする。つまり、

$$d_1 + d_2 = 一定$$

である。1,3 群が互いに一つの筒に内包され一緒に動くイメージである。中央の負群は固定で有る。図 1 右端をフィルム等のある像面と考えれば、2 群と像面は同じものに固定されていて、互いの距離が変化することは無い。1，３群のみを一体で動かして、変倍された像、つまりレンズ系全体が異なる焦点距離になった場合の像が、はたして固定された像面上に得られるのだろうか？これが可能であれば、非常に単純な構造でズームレンズが製造できることになる。

さって、結果のみ先にお伝えすると、移動量を近軸計算し探していくと、図の如くに上手く像面に焦点が一致する移動量△が存在する。3 群の場合には３点ある[1]。適当に各群の焦点距離、初期間隔を決めた、薄肉系の近軸計算結果では

	f_1＝100	f_2=－20	、f_3=50mm
d_1=	70.511	12.16	1.034mm、
d_2=	9.489	67.84	77.67mm の時
f=	486.92	33.7	24.38mm

として像面は一致する。これは結構素晴らしい結果である。この時、2 群から像面までの距離は 175mm と一定である。ズーミング時にはその他の点では焦点位置はずれていく。この計算例でも tele 近傍では 150mm 近く変動してしまうが、36 から 24mm ではそれでも 0.5mm 程度のずれに留まる。F ナンバー5.6 では、錯乱円直径は 0.1mm 程度には収まる。より適切な設定を検討し、焦点距離の変倍も考えれば用途によれば利用が出来る。こうした単純な光学系の動きによるズームを光学補正式ズームレンズと呼ぶ。図 1 にある光学系の原型は R.H.R.Cuvillier による PanCinor（パンシノール）（1949）[2]である。他にもいろいろな形の光学補正式が存在する[2][3]。実際には画質、ズーム倍率、コンパクト性などの観点から、カムなどの機構でダイナミックに、且つ精細に焦点を形成し続けていく機械補正式ズームレンズが主流となって行く。ただ、PanCinor 的な考え方は、本稿で登場する高倍率ズームレンズの構造を検討する上でも重要であり、また画像処理、AF 機構、様々な駆動機構の進化した現代では無視できない手法かもしれない。

2. 光学補正式ズームの焦点距離とバックフォーカスの計算

ここではもう少し解析的に考えてみよう。図 2 にある様に考える。基本的には図 1 の光学系と同じであるが群それぞれ焦点距離、そして焦点位置、それらの要素同士の間隔を図 2 に表示してある。

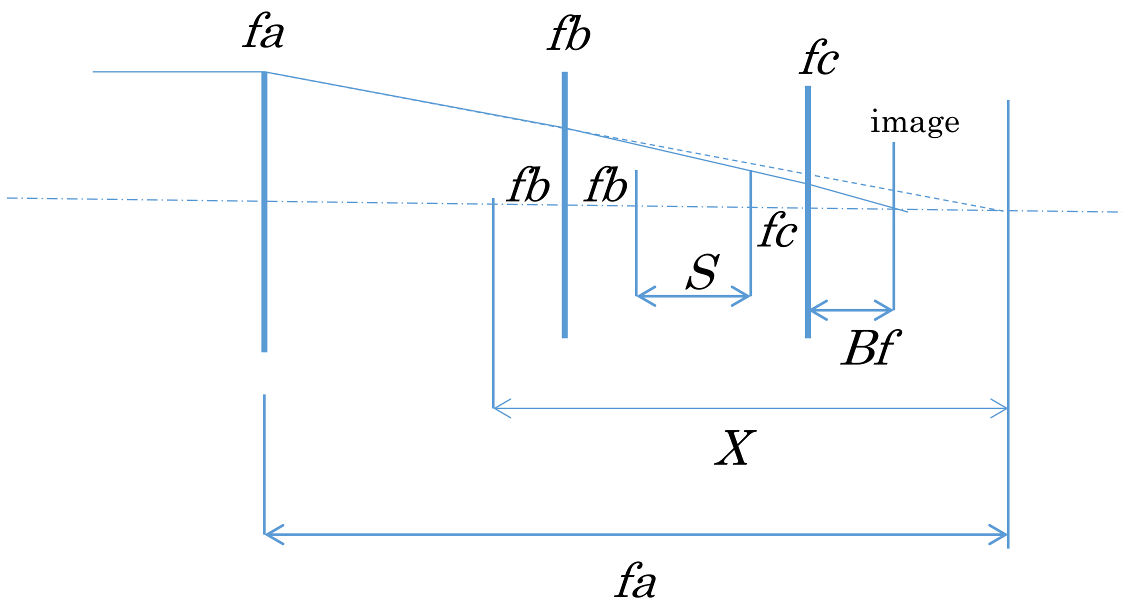

図 2　光学補正式ズームの近軸計算

ここで、また本連載 17 回(1)から(3)式、

$$N_{i+1}u_{i+1} = N_i u_i + \varphi_i h_i \qquad (17-1)$$

$$h_{i+1} = h_i - du_{i+1} \qquad (17-2)$$

ただし、

$$\varphi_i = \frac{N_{i+1} - N_i}{r_i} \qquad (17-3)$$

を参照する訳であるが、まず、各群の屈折力・パワーϕ、そして間隔 d は以下のとおりである。

群番号	1	2	3
ϕ	$1/f_a$	$1/f_b$	$1/f_c$
d		f_a+f_b-X	f_b+f_c+S

また、初期条件は $h_1=1$、$u_1=0$　であって、上の 3 式より光線高さ h、各面通過後の屈折角 u'は順次、

$$u_1' = u_1 + \varphi_1 h_1$$
$$= \frac{1}{f_a} \qquad (1)$$

$$h_2 = h_1 - d_1 u_1'$$

$$= 1 - (f_a + f_b - X)\frac{1}{f_a}$$
$$= \frac{X - f_b}{f_a} \qquad (2)$$

$$u_2' = u_2 + \varphi_2 h_2$$

$$= \frac{1}{f_a} + \frac{X - f_b}{f_a}\frac{1}{f_b}$$
$$= \frac{X}{f_a f_b} \qquad (3)$$

$$h_3 = h_2 - d_2 u_2'$$

$$= \frac{-f_b^2 - f_c X - XS}{f_a f_b}$$

(4)

$$
\begin{aligned}
u_3' &= u_3 + \varphi_3 h_3 \\
&= \frac{X}{f_a f_b} + \frac{-f_b^2 - f_c X - XS}{f_a f_b}\frac{1}{f_c} \\
&= -\frac{f_b^2 + XS}{f_a f_b f_c}
\end{aligned}
\qquad (5)
$$

従って、トータルの焦点距離 f は

$$
f = -\frac{f_a f_b f_c}{f_b^2 + XS} \qquad (6)
$$

バックフォーカス Bf は

$$
\begin{aligned}
Bf &= h_3 \times f \\
&= f_c + \frac{X f_c^2}{f_b^2 + XS}
\end{aligned}
\qquad (7)
$$

と表される。第 1 群の焦点位置には勿論影響を受けるが、第 1 群の焦点距離自体にはバックフォーカスは影響を受けないことが分かる。

7. 参考文献

[1]R.Kingslake:Lens Dsign Fundamentals(AcademicPress,SanDiego,1978),p66.
[2]ルドルフ･キングスレーク(雄倉保行訳)：写真レンズの歴史(朝日ソノラマ、東京、1999),p168
[3]中村荘一：”ズームレンズの歴史と収差補正“,OPTICS DESIGN,NO.23(2001), p.3

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
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