

クローズアップレンズ（倍率と作動距離）

カメラにクローズアップを取り付けたときに倍率はどうなるかという問題について再度検討してみた。これまで「クローズアップレンズの仕組み」[1]と題したクローズアップレンズの一般的な話と、「複合レンズの公式」[2]と題する、二枚のレンズを組み合わせた場合の焦点距離を求める話を書いてきたが、これらの話は必ずしも実際の計算には役に立ちそうにない。そこで、もう一度、原点に立ち戻って考えてみることにした。

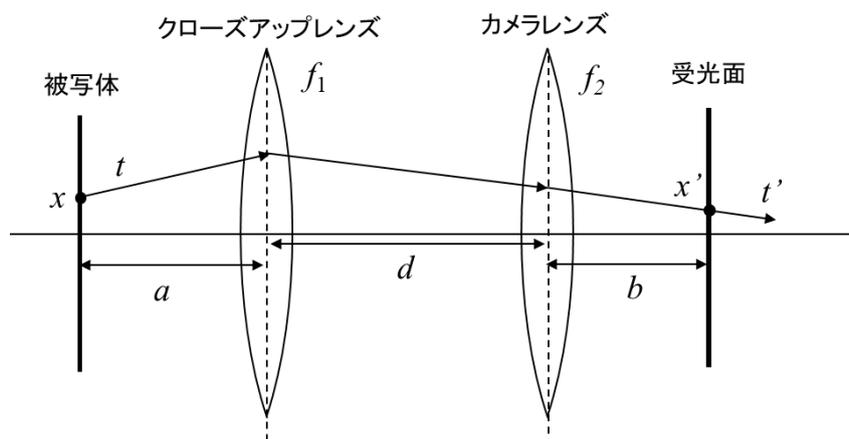


図1 クローズアップレンズを取り付けた場合の光学系

カメラレンズを一枚の単レンズとして考え、ここに凸レンズのクローズアップレンズを取り付けたときの光学系は図1のようになる。ここで、クローズアップレンズの焦点距離を f_1 、カメラレンズの焦点距離を f_2 とし、レンズ間の距離を d とした。また、被写体とクローズアップレンズ間の距離を a 、カメラレンズとカメラの受光面までの距離を b とした。

このような光学系で光がどう進むかという問題を解くときには光線行列を用いると大変便利である。光線行列の方法では、レンズは十分に薄い（薄肉レンズ）と考え、また、光線は中心軸の近く（近軸光線）を幾何光学的に進むと考えていく[3]。被写体上の一点の中心線からの距離を x 、光線の傾きを t とし、受光面上の到達点の中心線からの距離を x' 、光線の傾きを t' とすると、この両者は次の式で結び付けられる。

$$\begin{pmatrix} x' \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ t \end{pmatrix} \quad (1)$$

右辺には5個の行列が並んでいるが、右から a の距離の並進、 f_1 レンズによる屈折、 d の距離の並進、 f_2 レンズによる屈折、 b の距離の並進を意味している。この行列を計算すると、図1の光学系でのレンズの公式と倍率を求めることができるが、初めにクローズアップレンズとカメラレンズの組（複合レンズ）の部分の行列だけを計算してみると次のようになる。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 & d \\ -\frac{1}{F} & D_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、

$$D_1 = 1 - \frac{d}{f_1}$$

$$D_2 = 1 - \frac{d}{f_2}$$

また、

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad (3)$$

とおいた。

(2)式を用いて(1)式を計算すると、

$$\begin{pmatrix} x' \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 - \frac{b}{F} & D_1 a + D_2 b + d - \frac{ab}{F} \\ -\frac{1}{F} & D_2 - \frac{a}{F} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ t \end{pmatrix} \quad (4)$$

となる。従って、

$$x' = \left(D_1 - \frac{b}{F} \right) x + \left(D_1 a + D_2 b + d - \frac{ab}{F} \right) t \quad (5)$$

という関係式が得られる。この式から、光線が受光面上で収束するためには、光線の初期の方向 t に関わらず同じ x' を与える必要があるので、収束の条件は

$$D_1 a + D_2 b + d - \frac{ab}{F} = 0 \quad (6)$$

となり、これが間隔 d のときの複合レンズでのレンズの公式に該当する。変形すると、

$$\frac{D_2}{a} + \frac{D_1}{b} + \frac{d}{ab} = \frac{1}{F} \quad (6')$$

となる。また、倍率 M は

$$M = \left| \frac{x'}{x} \right| = \left| D_1 - \frac{b}{F} \right| = \frac{b}{F} - D_1 \quad (7)$$

となる。カメラレンズの位置 b を固定させて、クローズアップレンズをつけたり外したりしてその効果を調べるときは、クローズアップレンズから焦点の合う被写体までの距離 a （これを作動距離と呼ぶことにする）が必要になるので、(6)式から求めておこう。

$$a = -\frac{d + bD_2}{D_1 - \frac{b}{F}} = \frac{d + bD_2}{M} \quad (8)$$

ついでに撮影距離 L は

$$L = a + d + b \quad (9)$$

で表される。これで間隔 d の複合レンズの特性を表すすべての式が揃ったことになる。

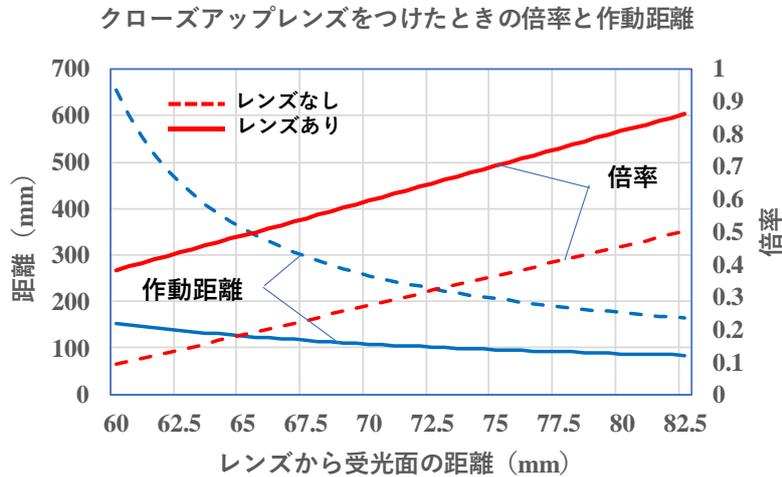


図2 クローズアップレンズをつけた場合とつけない場合の作動距離と倍率。ただし、クローズアップレンズとカメラレンズの焦点距離を 200 mm と 55 mm とし、二つのレンズは密着しているとする。

実際に、数値を入れてクローズアップレンズの効果を見てみよう。図2は焦点距離 55 mm のマクロレンズに焦点距離 200 mm のクローズアップレンズを密着させて取り付けられたときの倍率と作動距離を示したものである。横軸はマクロレンズのレンズの繰り出し量(図1の b に当たる)である。カメラレンズとしては Micro-Nikkor 55mm F2.8 を想定しているので、最大繰り出し量を 82.5 mm としている。その時の倍率は 0.5 倍である。破線はクローズア

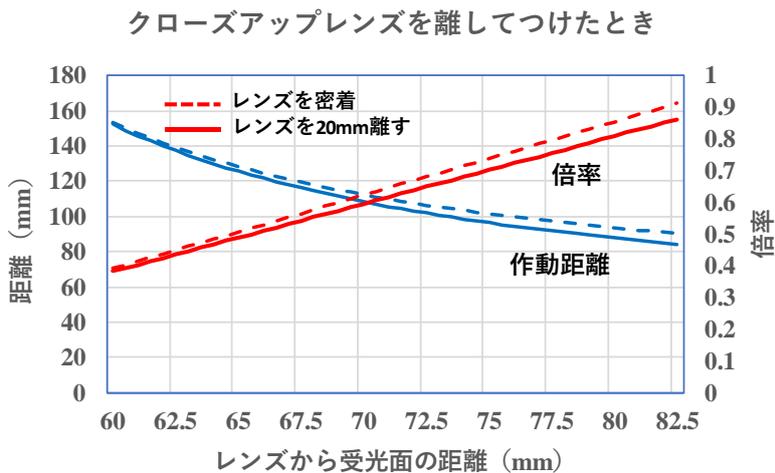


図3 クローズアップレンズをカメラレンズに密着させた場合と 20 mm 離して取り付けられた場合の作動距離と倍率。ただし、クローズアップレンズとカメラレンズの焦点距離を 200 mm と 55 mm とした。

アップレンズがないとき、実線はあるときを示している。クローズアップレンズがないときは、レンズの繰り出し量を増やしていくと、倍率は直線的に増加し、最終的に 0.5 倍に達している。一方、作動距離（この場合はカメラレンズから被写体までの距離）は徐々に減少し、最終的に 164.7 mm になっている。これに焦点距離 200 mm のクローズアップレンズを密着させて取り付けると倍率は 2 倍近くの 0.91 倍にまで上がっている。一方、作動距離（このときはクローズアップレンズから被写体までの距離）はそれに伴って減少し、90.4 mm にまで減少する。

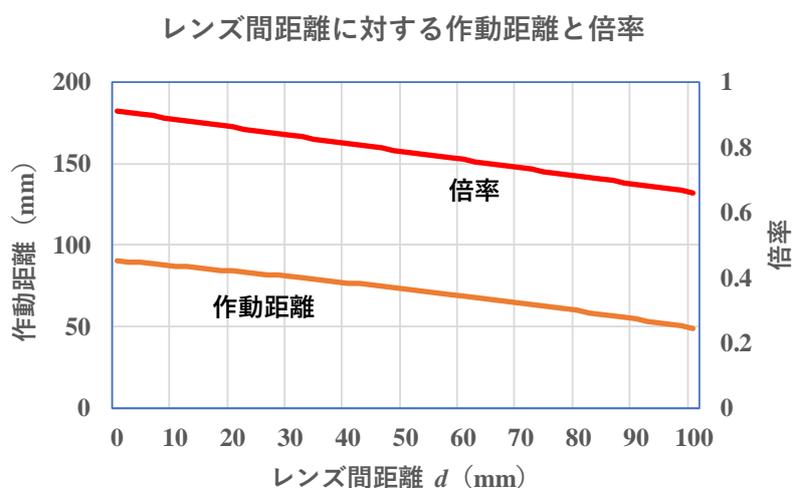


図4 クローズアップレンズをカメラレンズから離れたときの作動距離と倍率。ただし、クローズアップレンズとカメラレンズの焦点距離を 200 mm と 55 mm とした。また、カメラレンズと受光面までの距離を 82.5 mm とした。

次にクローズアップレンズをカメラレンズから離して取り付けただけの場合の倍率と作動距離を計算してみた。図3はクローズアップレンズを密着させた場合と 20 mm 離れた場合の比較である。また、図4はカメラレンズを最大繰り出し量 82.5 mm に固定したとき、クローズアップレンズを密着させたときから 10 cm 離れたときまでを計算した結果である。いずれにしても、クローズアップレンズをカメラレンズから離して取り付けると倍率が減少するが、同時に作動距離も減少することが分かる。しかし、その減少の割合は比較的わずかであり、大きく離さない限り、大勢にあまり影響しないことが分かる。クローズアップレンズの位置はそれほど気にしなくてもよさそうである。

[1] 「クローズアップレンズの仕組み」

<http://fashionotori.yukihotaru.com/close-up%20lens1.pdf>

[2] 「複合レンズの公式」

<http://fashionotori.yukihotaru.com/fukugourenzu1.pdf>

[3] A. Yariv, "Quantum Electronics, 2nd ed.", John Wiley & Sons, NY (1975); D. Marcuse (末松安晴ほか訳)、「量子エレクトロニクス その工学的基礎」、丸善 (1976)。