

ズームレンズの理論的検討

— その3 望遠カメラ —

2021(令和3)年06月11日

菅原 政治郎

1. 背景

ズームレンズの理論的検討ーその2までは、眼を最終レンズとして結像させる解析を実施してきました。その中では、眼に入る前の実像・虚像を拡大して物を大きくして見えています。それには眼が自動的に毛様体を収縮・膨張させてピントを合わせています。

本資料では、望遠カメラを念頭に、複数の凸・凹レンズを組合せ、数値解析によりフィルム位置に光が収束する様に、光の光跡を検討したいと思います。

望遠鏡と望遠カメラの本質的な違いは、望遠鏡は眼に入る前に虚像を作って被写体を拡大して見る事であり、一方、望遠カメラはフィルム上に結像をすることであり、最終レンズで結像する像は、必ず実像である点です。

注:

本資料での実像とは、光の進行方向に対して光線が収束する状態を指します。また、虚像とは、光の進行方向に対して光線が発散する状態を指します。

2. 複数枚の組合せレンズの検討

複数の凸・凹レンズの組合せによる理論的検討は、その2に示しましたので、本章ではどのようにしてフィルム位置に正確に結像させるかについて、説明致します。

2.1 解析体系

レンズの図示的位置関係は、図2.1に示すものです。解析の都合上、原点(0,0)をフィルムの中心とし、光軸をX軸とし、フィルムの中心を通りX軸に垂直な軸をY軸とします。フィルムから見て被写体方向をプラスとします。(既報その2と位置関係が異なります(左右反転)のでご注意ください。)

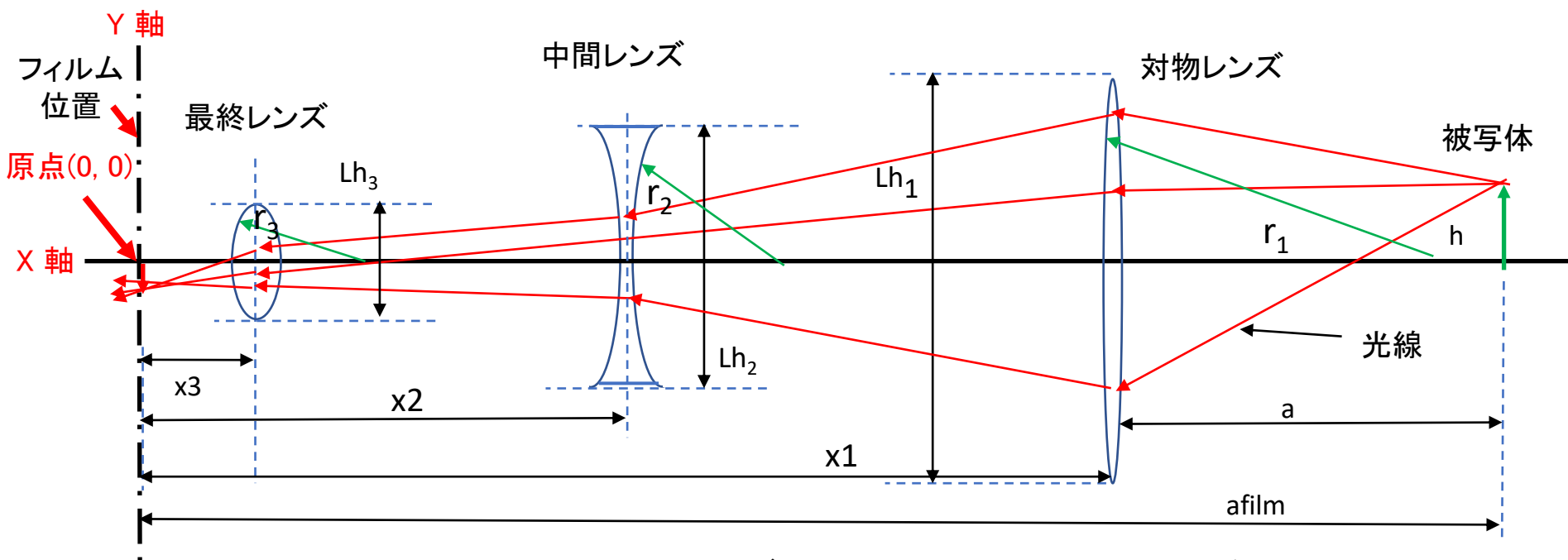


図2.1 レンズの図示的位置関係(イメージ図)

ここに、

a: 被写体-フィルム間距離(固定値)、a: 被写体-対物レンズ間距離(可変)、h: 被写体の高さ
x1: 対物レンズ-フィルム間距離(可変)、r1: 対物レンズの曲率半径、Lh1: 対物レンズの口径
x2: 中間レンズ-フィルム間距離(可変)、r2: 中間レンズの曲率半径、Lh2: 中間レンズの口径
x3 : 最終レンズ-フィルム間距離(可変)、r3: 最終レンズの曲率半径、Lh3: 最終レンズの口径

上記の他に、説明の都合上、以下とします。

f1: 対物レンズの焦点距離、f2: 中間レンズの焦点距離、f3 : 最終レンズの焦点距離

Ldist(i): i番目のレンズの左側余裕距離(レンズ同志がぶつからないための距離) (図2.2A参照)、

Rdist(i): i番目のレンズの右側余裕距離 (図2.2A参照)

ここに、 $i=1$ を対物レンズとし、フィルムに近づくに従って、番号が大きくなります。

Llimit: 対物レンズ-フィルム間最大移動可能距離 (これ以上対物レンズは被写体に近づけません)

xLmt(i) i番目のレンズのフィルム側位置の可動制限位置 (図2.2B参照)

mechend: 最終レンズ-フィルム間距離 (図2.2B参照)

mechspace: 最終レンズがピントを合わせるために必要な移動確保距離 (図2.2B参照)

dLp: 対物レンズ、中間レンズを移動させる場合の、1回当たりの移動距離

Niter: 繰返し計算制限数

ε 結像位置収束判定値 (フィルム-結像位置許容誤差)

ζ 光線幅収束判定値 (図2.3参照)

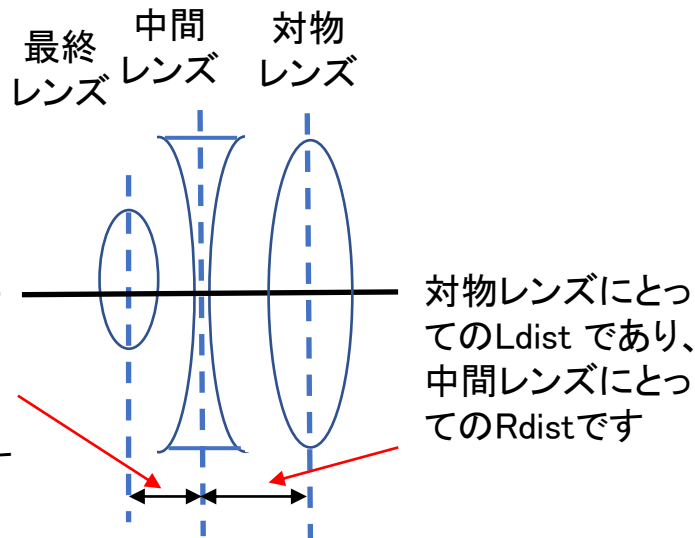


図2.2A レンズ間距離のイメージ図

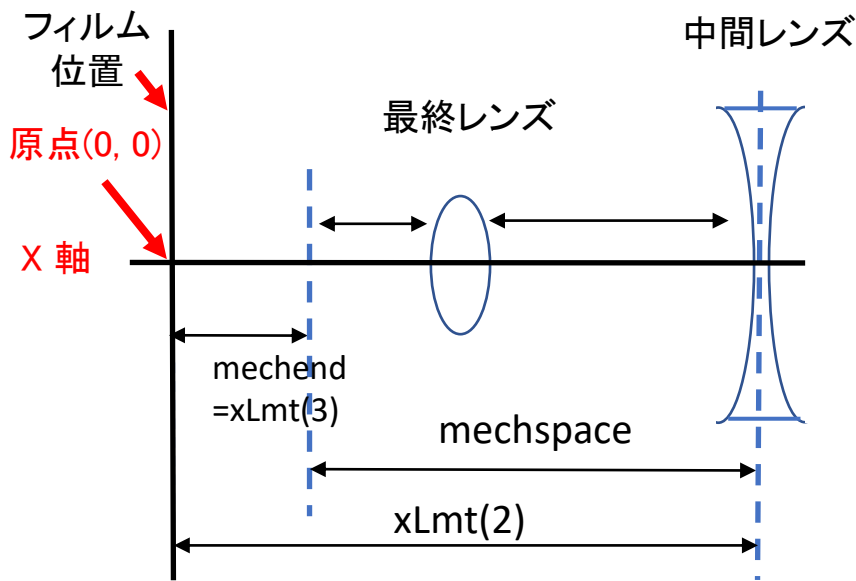


図2.2B レンズ間距離のイメージ図

前述のレンズ間距離の記号について説明します。

- ① $Ldist(i)$: i 番目のレンズが左側のレンズとの間に保つべき最低限の距離で、各レンズの幅と間に1mmの余裕を含めた距離です。
- ② $Rdist(i)$: i 番目のレンズが右側のレンズとの間に保つべき最低限の距離で、各レンズの幅と間に1mmの余裕を含めた距離です。ここで $Ldist(i) = Rdist(i+1)$ となります。
- ③ $mechend$: 最終レンズ-フィルム間制限距離で、機械的に最終レンズがフィルムに近づくことを制限する距離です。
- ④ $mechspace$: 最終レンズが中間レンズと $mechend$ 間で自由に可動出来る最低確保距離(最終レンズがフィルムに結像させるために確保する距離です)
- ⑤ $xLmt(i)$: i 番目のレンズのフィルム側位置の可動制限位置で、図2.2Bに示す様に、例えば中間レンズ ($i = 2$) の場合、最終レンズの可動距離確保のため、 $xLmt(2) = mechend + mechspace$ となります。また、最終レンズ ($i = 3$) については、 $xLmt(3) = mechend$ となります。

2.2 光線収束方法

2.2.1 仮定

- (1) 各レンズには、可動領域が有り、それを超えることは出来ないとし、初期設定位置として、対物レンズ、中間レンズは最も被写体に近い位置に設定します。即ち、 $x1=Llimit$ 、 $x2=x1-Rdist(2)$ と設定します。
- (2) 上記(1)の下で、中間レンズが移動できる距離(dLp)を初期位置から移動し、最終レンズが移動可能範囲で光線を集光し、フィルムに結像させます。
- (3) 結像位置の誤差は ε とし、それ以内であれば結像したものとします。
- (4) 結像しない場合は、最終レンズの位置を適切な位置に移動させて結像させるが、Niter 以内の繰り返し計算で収束しない場合は、結像は無いものとします。
- (5) 上記(3),(4)の処理で、中間レンズが最終位置に来たときは、対物レンズに移動の可能性が有るときは、 dLp だけ移動し、 $x1 \Rightarrow x1-dLp$ 、 $x2=x1-Rdist(2)$ と設定して、解析を続行します。
- (6) 解析に使用する光線本数を nm とし、フィルムに到達する光線数が nm である場合を解とします。(途中でレンズを外れる光線が出て来ます。その場合は光学倍率の計算において不当な数値を与えるため、これらを除外します。)

2.2 光線収束方法

2.2.1 仮定（続き）

- (7) 結像位置での光線幅が δ 以下のものを解とし、それ以外は除外します。(図2.3に示す様に、結像位置がフィルム上であっても、光線幅が0.5mmとなり、結像がぼやけている結果となります。このため、光線幅が δ 以下であることを条件としました。)

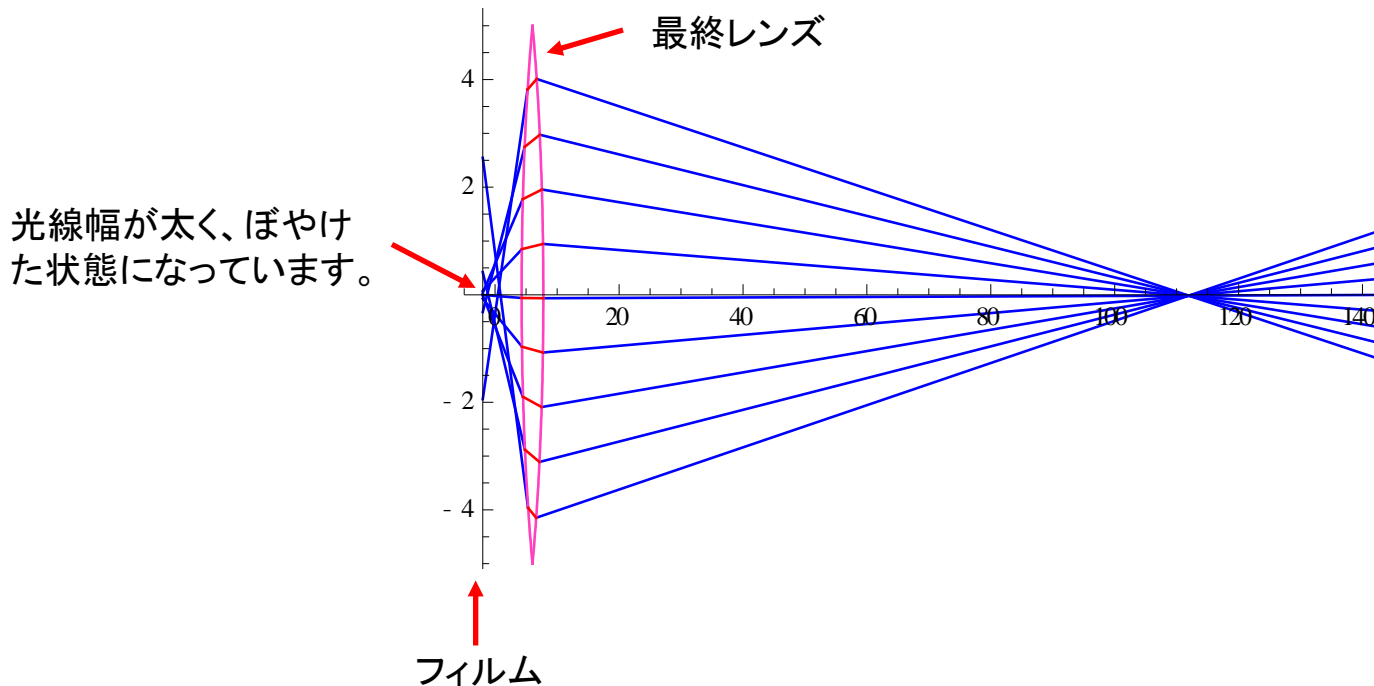


図2.3 最終レンズの結像位置

2.2 光線収束方法（続き）

2.2.2 最終レンズの位置推定法

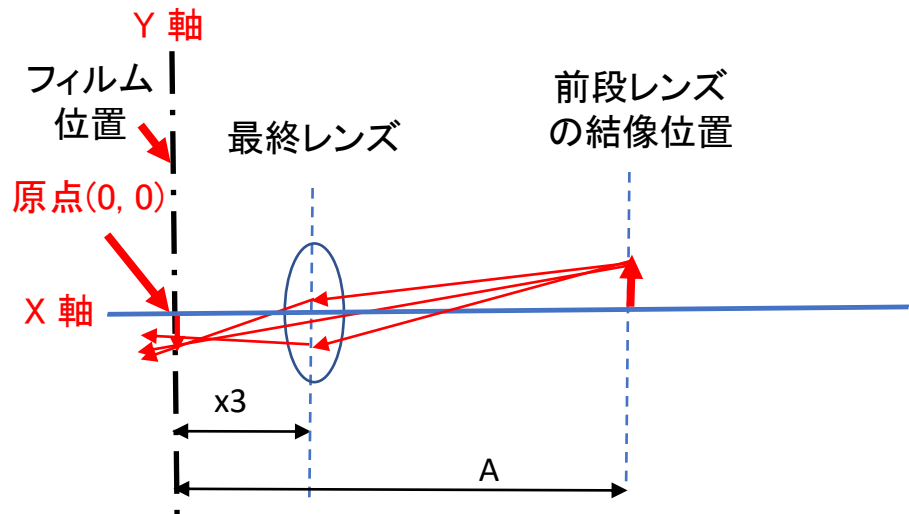


図2.4 前段レンズの結像位置と最終レンズの結像位置

ステップ1 初期位置推定

図2.4に、前段レンズの結像位置Aと最終レンズの結像位置の関係を示します。既にAは計算で求まっています。

このため、以下のレンズの式により、最終レンズの位置 x_3 の推定が可能です。

$$\frac{1}{(A - x_3)} + \frac{1}{x_3} = \frac{1}{f_3} \quad \dots(1)$$

ここに、 f_3 : 最終レンズの焦点距離

式(1)より、 x_3 の解は、式(2)となります。

$$x_3 = \frac{1}{2} [A \pm (A^2 - 4A \cdot f_3)^{\frac{1}{2}}] \quad \dots(2)$$

式(2)が実根を持つためには、以下が必要です

$$A^2 - 4A \cdot f_3 \geq 0. \quad \dots(3)$$

式(3)の条件の下に、式(2)を満たす x_3 を求めます。解は2個存在します。それらを x_{3a} , x_{3b} とします。

$$x_{3a} = \frac{1}{2}[A + (A^2 - 4A \cdot f_3)^{\frac{1}{2}}], \quad x_{3b} = \frac{1}{2}[A - (A^2 - 4A \cdot f_3)^{\frac{1}{2}}] \quad \dots(4)$$

式(4)で、プラスの値を与える解を x_3 とします。2個ともにプラスの場合は、前段のレンズ位置を超えない値を解とします。

また、最終レンズがフィルム間に確保しなければならない距離 $mechend$ 以上であるものを解とします。

その解の位置を用いて、結像位置 B_1 を求めます。結像位置とフィルムの位置との差を Δ_1 とします。即ち、以下です。

$$\Delta_1 = B_1 - 0 = B_1 \quad \dots(5)$$

ここに、接尾語1は繰返し計算番号を示します。

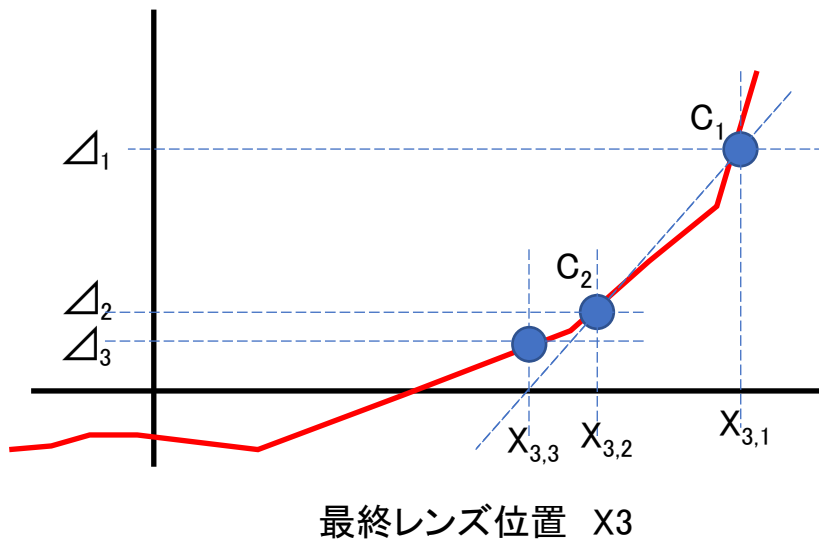
ステップ2

ステップ1で推定される最終レンズの位置は、薄肉レンズについてのものである事と、球面収差のために結像位置が光線の位置により若干異なってきます。このため、ステップ2では、初期推定位置から、僅かにずれた位置 δ を最終レンズの位置 ($x_3 + \delta$) として、結像位置 B_2 を求めます。この時点では、 Δ_2 は仮定(3)で示した誤差範囲 ε 以内には入っていないものと思われれます

ステップ3 真位置の推定

ステップ2までの推定値を用い、簡単なニュートン法を用いて最終レンズの真位置を推定します。

結像誤差 Δ



ステップ1での最終レンズの位置を $x_{3,1}$ 、結像誤差を Δ_1 とし、この点を C_1 とします。

同様に、ステップ2での最終レンズの位置を $x_{3,2}$ 、結像誤差を Δ_2 とし、この点を C_2 とします。

ステップ3での最終レンズの位置 $x_{3,3}$ は、左の図2.5に示す様に、2点 C_1 、 C_2 を延長して Δ が0となる点とします。

即ち、以下となります。

図2.5 ニュートン法による位置推定法の概念図

$$a = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{X_{3,1} - X_{3,2}}, \quad X_{3,3} = X_{3,2} - \frac{\Delta_2}{a} \quad \dots(6)$$

ここに、a: 前述2点C1, C2を通る直線の傾き

式(6)で与えられる新推定値を用い、結像位置が0、即ちフィルム位置に結像する様に、繰返し計算により、最終レンズの位置を求めます。

2.3 光学倍率

既報その2では、眼を通して被写体を見る望遠鏡等のため、光学倍率 M の定義として、虚像の視角と被写体の視角の比としました。

今回はフィルムに写る実像を対象としているため、図2.6に示す様に、最終レンズ位置を中心として、フィルムに写る実像の視角と被写体の視角の比を光学倍率 M の定義としました。即ち、以下です。

$$M = \frac{\text{Tan}[\beta]}{\text{Tan}[\alpha]} = \frac{\text{Tan}\left[\left|\frac{h'}{x_3}\right|\right]}{\text{Tan}\left[\left|\frac{h}{a_{\text{film}} - x_3}\right|\right]} \quad \dots(7)$$

ここに、 h :被写体の高さ、 h' :結像の高さ

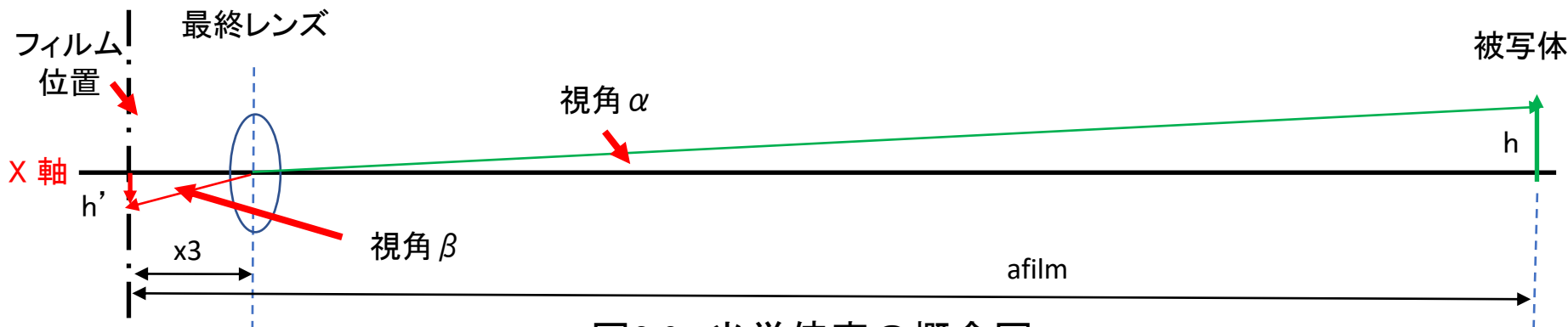


図2.6 光学倍率の概念図

3. サンプル計算 2枚組合せレンズ

本章では、2枚組合せレンズを対象とし、3.1節にて凸・凸レンズ、3.2節にて凸・凹レンズの組合せカメラの解析について検討します。なお、使用する諸量は凸、凹の違いの他は、焦点距離、口径等は同じものとしします。

(焦点距離と口径を維持するため、曲率半径が若干異なってきます。これが光跡に微妙に影響を与えます。)

3.1 凸($f_1=100\text{mm}$) -凸($f_2=10\text{mm}$) レンズ

3.1.1 計算条件

表3.1.1に示す様に対物レンズ凸($f_1=100\text{mm}$)、最終レンズ凸($f_2=10\text{mm}$) の2枚組のサンプル計算を実施しました。

表3.1.1 2枚組凸・凸レンズの解析条件

- 被写体-フィルム間距離(固定) $a_{\text{film}} = 10000.\text{mm}$ 、
- 被写体-対物レンズ間距離(変動) $a = 9850.\text{mm}$ 、
- 対物レンズ-フィルム間最大距離 $L_{\text{limit}} = 150.\text{mm}$
- 被写体の高さ $h = 5.\text{mm}$
- 空気の屈折率= 1.、解析用光線本数 $n_m = 9$ 、(有効光線数= 9 本。)
- 解析対象レンズ枚数= 2、種類= {凸レンズ,凸レンズ}、
- レンズ移動制限位置 $x_{\text{Lmt}} = \{15.,5.\}$ 、レンズ移動距離 $d_{\text{Lp}} = 1.\text{mm}/\text{回}$
- 左余裕 $L_{\text{dist}} = \{5,3\}$ 、右余裕 $R_{\text{dist}} = \{4,5\}\text{mm}$
- 機械的制約長 $\text{mechend} = 5.\text{mm}$ 、最終レンズ最低可動幅 $\text{mechspace} = 10\text{mm}$ 。
- 繰返し計算制限数 $\text{niter} = 15$ 、収束誤差 $\varepsilon : 0.01\text{mm}$ 以下、光線束誤差 $\zeta : 0.01\text{mm}$ 以下

No. 1, 対物レンズ, 種類= 凸レンズ, フィルムからの距離= 150. mm

- (1)屈折率 $r_{\text{ft}} = 1.5$, 焦点距離 $\text{focus} = 100.\text{mm}$
- (2)曲率半径 $r_{\text{L}} = 100.\text{mm}$, $r_{\text{R}} = -100.\text{mm}$, $L_{\text{cntL}} = 97.4359\text{mm}$, $L_{\text{cntR}} = -97.4359\text{mm}$
- (3)口径 $L_{\text{h}} = 45.\text{mm}$ 、厚さ $\text{depL} = 5.12825\text{mm}$
- (4)映像位置 $b_{\text{film}} = 145.\text{mm}$ (フィルムからの距離)

No. 2, 最終レンズ, 種類= 凸レンズ, フィルムからの距離= 145 mm

- (1)屈折率 $r_{\text{ft}} = 1.4$, 焦点距離 $\text{focus} = 10.\text{mm}$
- (2)曲率半径 $r_{\text{L}} = 8.\text{mm}$, $r_{\text{R}} = -8.\text{mm}$, $L_{\text{cntL}} = 6.245\text{mm}$, $L_{\text{cntR}} = -6.245\text{mm}$
- (3)口径 $L_{\text{h}} = 10.\text{mm}$ 、厚さ $\text{depL} = 3.51\text{mm}$
- (4)映像位置 $b_{\text{film}} = 0.00\text{mm}$ (フィルムからの距離)

3.1.2 計算結果

光学倍率が最大となる場合の計算結果を表3.1.2に示します。

表3.1.2 2枚組凸・凸レンズの光学倍率最大の場合の諸量

- 最大光学倍率 = 8.25
- その時の対物レンズ位置 = 92.mm、最終レンズ位置 = 5.08 mm (フィルム位置から)
- その時の対物レンズの結像位置 = -7.240mm、最終レンズの結像位置 = 0.0033mm
- その時の対物レンズの結像高さ = -0.0505mm、最終レンズの結像高さ = -0.0209mm
- 解析総数 = 137、有効解析数 = 90 (収束条件を満たさなかった件数は47)

(137-90= 47ケースは、最終レンズで実像が15回の繰返し計算でフィルム上に結像しなかったか、有効光線数が9以下か、或いは光線幅が0.01mm以上の可能性が有ります。)

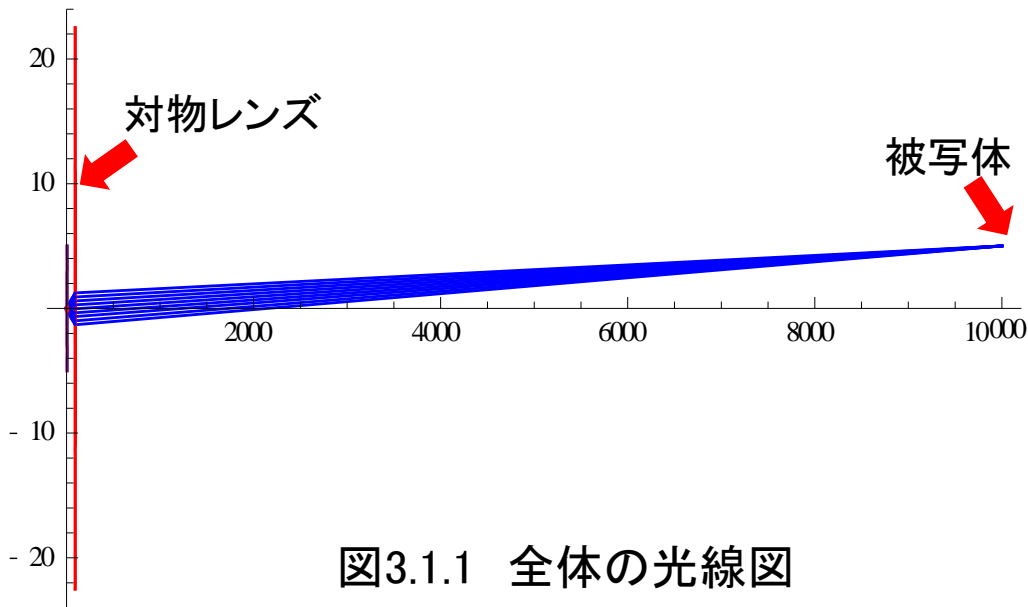


図3.1.1 全体の光線図

- ① 全体の光線図を図3.1.1に示します。被写体はフィルム位置から10m先にあります。全体を見ると、対物レンズ以降の距離は、被写体と対物レンズ間の距離に較べれば、無視できるほどに短いことが分かります。

- ② 光線のフィルム上への結像がなされていることを確認するため、対物レンズ以降の光線図を、図3.1.2に示します。

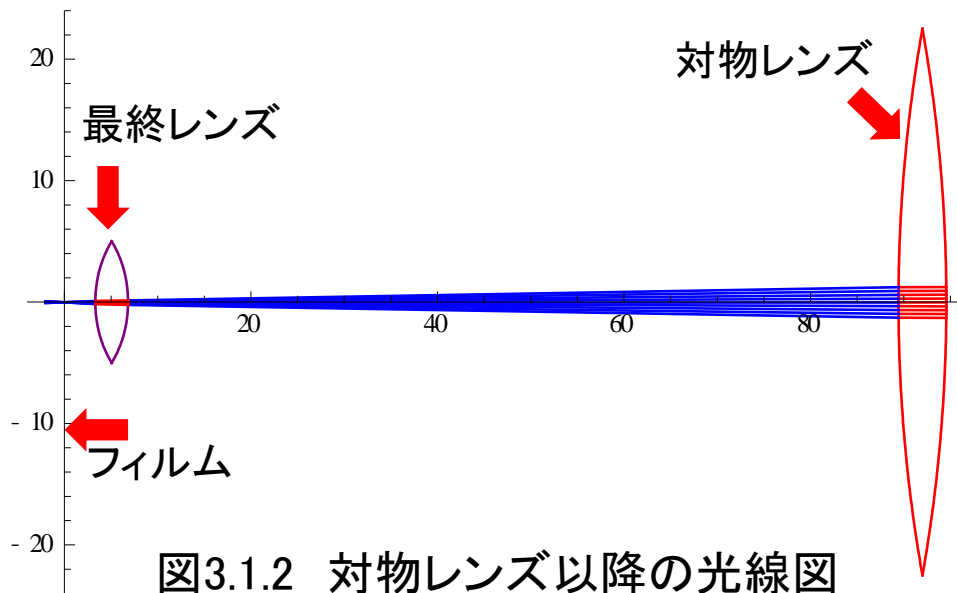


図3.1.2 対物レンズ以降の光線図

被写体から出た光線は、対物レンズで収束され、更に最終レンズで収束されてフィルム上に結像していることが分かります。

光学高倍率20個の倍率、対物レンズ位置と最終レンズ位置のデータを表3.1.3に示します。

表3.1.3 2枚組凸・凸レンズの光学倍率上位20個の諸量

{8.24728,92.,5.06796}, {7.59183,91.,5.2211}, {7.04019,90.,5.35722}, {6.56848,89.,5.47926}, {6.15977,88.,5.58947},
{5.80172,87.,5.68961}, {5.48508,86.,5.78109}, {5.20279,85.,5.86504}, {4.94932,84.,5.94242}, {4.72031,83.,6.01399},
{4.51224,82.,6.08041}, {4.32225,81.,6.14223}, {4.148,80.,6.19993}, {3.98753,79.,6.25391}, {3.89418,140.,11.0842},
{3.83921,78.,6.30453}, {3.74469,141.,10.9224}, {3.70165,77.,6.35209}, {3.60866,142.,10.7781}, {3.57366,76.,6.39686}

↑
↑
↑
光学倍率
対物レンズ位置
最終レンズ位置

③対物レンズの可動範囲は150mm～15mmですが、最大の倍率は、対物レンズの焦点距離である100mm近辺に有ることが分かります。図3.1.2に示した様に、最終レンズには収束光として入光します。

④ 高倍率を表す対物レンズと最終レンズの位置の組合せは離散的なものであり、任意の組合せではないことが分かります。(図3.1.3参照)

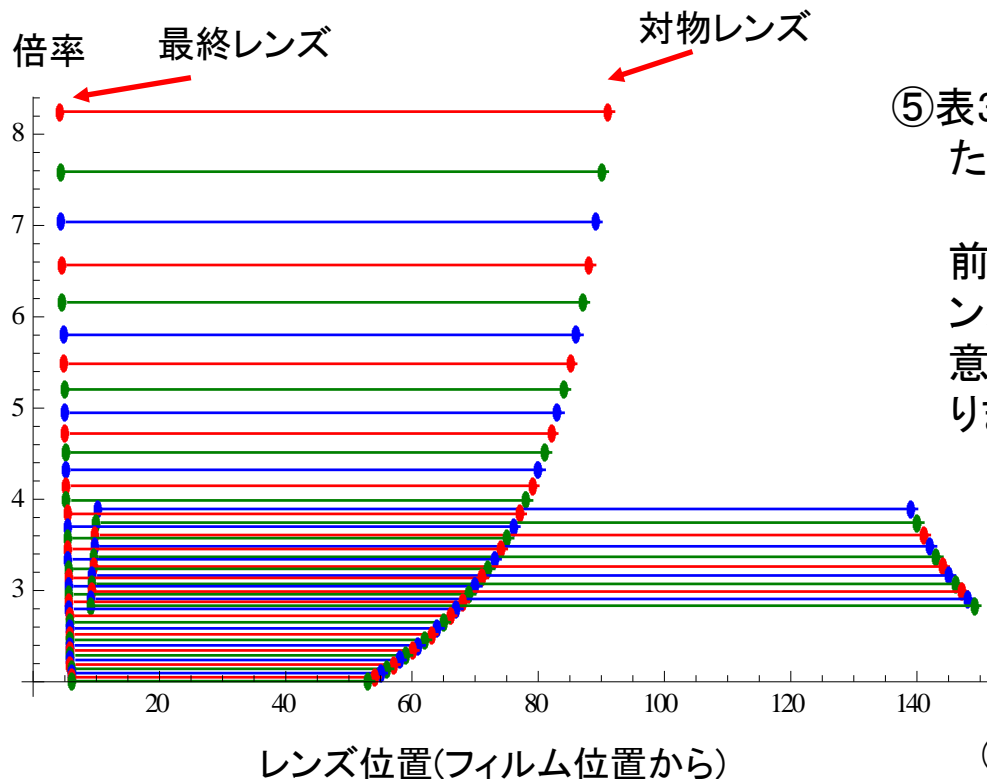


図3.1.3 高倍率のレンズ位置図
(上位50個)

⑤表3.1.3に示した結果をレンズ位置とともに表示したものが図3.13です。(上位50個)

前述した様に、高倍率を表す対物レンズと最終レンズの位置の組合せは離散的なものであり、任意の組合せではないことが、これらの図から分かります。

⑥図中、対物レンズが90mmの位置にあるものは、最終レンズに対して、収束光として入光します。(図3.1.2参照)

⑦一方、対物レンズが150mmの位置にあるものは、最終レンズに対して、拡散光として入光します。拡散光の例は、前述図2.3に示すものです。

⑧上図に示す様に、二種類の結像(収束光か拡散光か)様式が出て来ますが、拡散光の場合は収束光の場合に較べて倍率が低いので、カメラ設計としては対物レンズの可動域(Llimit)を92mmに限定すれば、ズームレンズとして使用出来ることが分かります。

⑨また、上図に示す様に、最終レンズの位置は殆ど変化していないため、微妙なピント合わせに最終レンズを微調整すれば良いことが分かります。

3.2 凸($f_1=100\text{mm}$) -凹($f_2=-10\text{mm}$) レンズ

3.2.1 計算条件

最終レンズに凹レンズを使用してもフィルムに結像するのかを確かめるため、表3.2.1に示す様に対物レンズ凸($f_1=100\text{mm}$)、最終レンズ凹($f_2=-10\text{mm}$)の2枚組のサンプル計算を実施しました。

表3.21 2枚組凸・凹レンズの解析条件

- 被写体-フィルム間距離(固定) $a_{\text{film}} = 10000\text{mm}$ 、
- 被写体-対物レンズ間距離(変動) $a = 9850.\text{mm}$ 、
- 対物レンズ-フィルム間最大距離 $L_{\text{limit}} = 150.\text{mm}$
- 被写体の高さ $h = 5.\text{mm}$
- 空気の屈折率= 1.、解析用光線本数 $n_m = 9$ 、(有効光線数= 9 本。)
- 解析対象レンズ枚数= 2、種類= {凸レンズ,凸レンズ}、
- レンズ移動制限位置 $x_{\text{Lmt}} = \{15.,5\}$ 、レンズ移動距離 $d_{\text{Lp}} = 1.\text{mm}/\text{回}$
- 左余裕 $L_{\text{dist}} = \{4,2\}$ 、右余裕 $R_{\text{dist}} = \{4,4\}\text{mm}$
- 機械的制約長 $\text{mechend} = 5.$ 、最終レンズ最低可動幅 $\text{mechspace} = 10\text{mm}$ 。
- 繰返し計算制限数 $\text{niter} = 15$ 、収束誤差 $\varepsilon : 0.01\text{mm}$ 以下、光線束誤差 $\zeta : 0.01\text{mm}$ 以下

No. 1, 対物レンズ, 種類= 凸レンズ, レンズオプション = 1, フィルムからの距離= 150. mm

- (1)屈折率 $r_{\text{ft}} = 1.5$, 焦点距離 $\text{focus} = 100.\text{mm}$
- (2)曲率半径 $r_{\text{L}} = 100.\text{mm}$, $r_{\text{R}} = -100.\text{mm}$, $L_{\text{cntL}} = 97.4359\text{mm}$, $L_{\text{cntR}} = -97.4359\text{mm}$
- (3)口径 $L_{\text{h}} = 45.\text{mm}$ 、厚さ $\text{depL} = 5.12825\text{mm}$
- (4)映像位置 $b_{\text{film}} = 146.\text{mm}$ (フィルムからの距離)

No. 2, 最終レンズ, 種類= 凹レンズ, レンズオプション = 1, フィルムからの距離= 146 mm

- (1)屈折率 $r_{\text{ft}} = 1.4$, 焦点距離 $\text{focus} = -10.\text{mm}$
- (2)曲率半径 $r_{\text{L}} = -8.\text{mm}$, $r_{\text{R}} = 8.\text{mm}$, $L_{\text{cntL}} = -8.5\text{mm}$, $L_{\text{cntR}} = 8.5\text{mm}$
- (3)口径 $L_{\text{h}} = 10.\text{mm}$ 、厚さ $\text{depL} = 1.\text{mm}$
- (4)映像位置 $b_{\text{film}} = 0.\text{mm}$ (フィルムからの距離)

3.2.2 計算結果

2枚組レンズの場合、最終レンズに凹レンズを使用してもフィルムに結像することが確かめられました。しかも、3.1節の凸・凸レンズの組合せよりも光学倍率が高い結果となりました。

光学倍率が最大となる場合の計算結果を表3.2.2に示します。

表3.2.2 2枚組凸・凹レンズの光学倍率最大の場合の諸量

- 最大光学倍率 = 25.0966
- その時の対物レンズ位置 = 102.mm、最終レンズ位置 = 6.4211 mm (フィルム位置から)
- その時の対物レンズの結像位置 = 2.7589mm、最終レンズの結像位置 = -0.0059mm
- その時の対物レンズの結像高さ = -0.0505mm、最終レンズの結像高さ = -0.0807mm
- 解析総数 = 137、有効解析数 = 49 (収束条件を満たさなかった件数は88)

(137-49= 88 ケースは、最終レンズで実像が15回の繰返し計算でフィルム上に結像しなかったか、有効光線数が9以下か、或いは光線幅が0.01mm以上の可能性が有ります。)

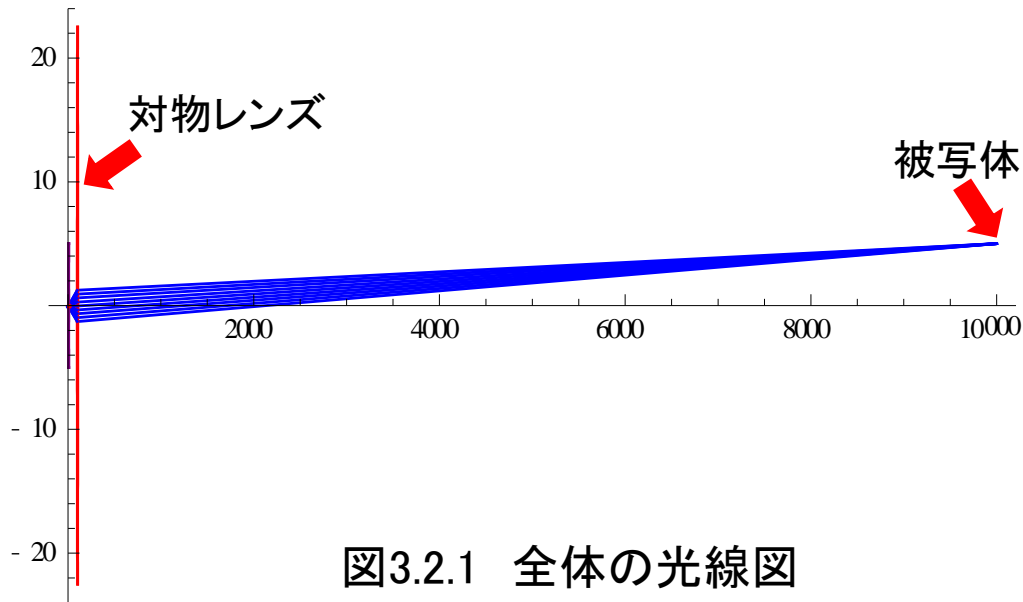


図3.2.1 全体の光線図

- ① 全体の光線図を図3.2.1に示します。被写体はフィルム位置から10m先にあります。全体を見ると、対物レンズ以降の距離は、被写体と対物レンズ間の距離に較べれば、無視できるほどに短いことが分かります。この図は、3.1節の図と同じものです。

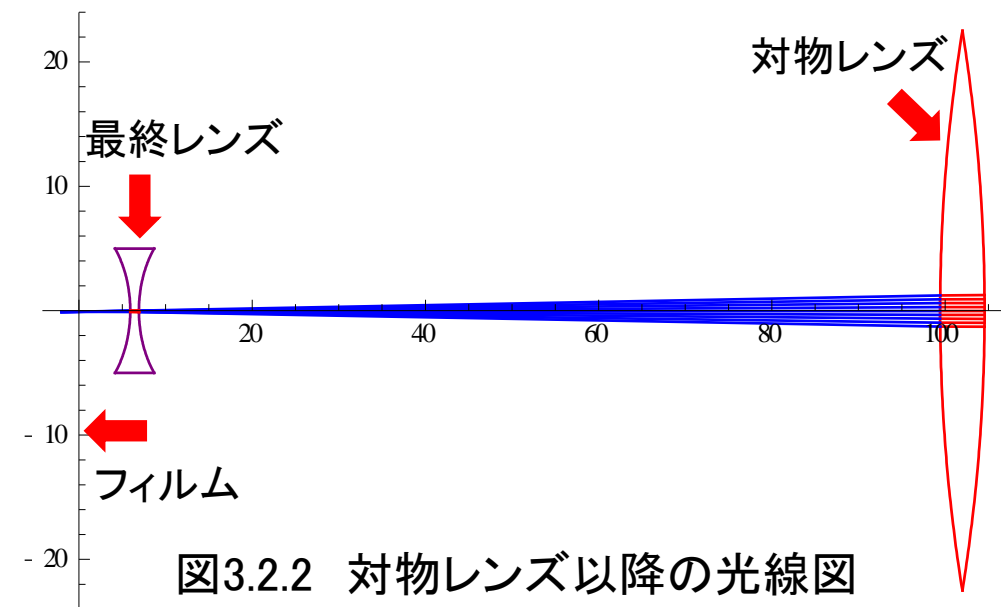


図3.2.2 対物レンズ以降の光線図

- ② 光線のフィルム上への結像がなされていることを確認するため、対物レンズ以降の光線図を、図3.2.2に示します。

被写体から出た光線は、対物レンズで収束され、更に最終レンズで収束されてフィルム上に結像していることが分かります。

凹レンズと言うと、光は拡散されて虚像を作るものと思いがちですが、この様に凸レンズと組み合わせると、光は収束します。この点が望遠カメラを考える上で重要になってきます。

光学高倍率20個の倍率、対物レンズ位置と最終レンズ位置のデータを表3.2.3に示します。

表3.2.3 2枚組凸・凹レンズの光学倍率上位20個の諸量

{25.0966,102.,6.42112}, {22.0983,103.,7.95616}, {20.1962,104.,9.37785}, {18.8588,105.,10.7253}, {17.8561,106.,12.0198},
{17.0707,107.,13.2747}, {16.4357,108.,14.4985}, {15.9096,109.,15.6975}, {15.4652,110.,16.8761}, {15.0841,111.,18.0376},
{14.7531,112.,19.1847}, {14.4623,113.,20.3195}, {14.2047,114.,21.4434}, {13.9745,115.,22.5581}, {13.7675,116.,23.6644},
{13.579,117.,24.764}, {13.4089,118.,25.8564}, {13.2533,119.,26.9429}, {13.1105,120.,28.0241}, {12.9781,121.,29.101},

↑
↑
↑
最終レンズ位置
対物レンズ位置
光学倍率

③対物レンズの可動範囲は150mm～15mmですが、最大の倍率は、対物レンズの焦点距離である100mm近辺に有ることが分かります。図3.2.2に示した様に、最終レンズには収束光として入光します。

④表3.2.3より、対物レンズ-最終レンズ間の距離が95～92mmの間に存在していることが分かります。これは対物レンズの光線を最終レンズが収束光線としてフィルムに結像させる組合せで、これ以外の組合せは、虚像になるか、フィルムに結像しない組合せとなるからと思われます。

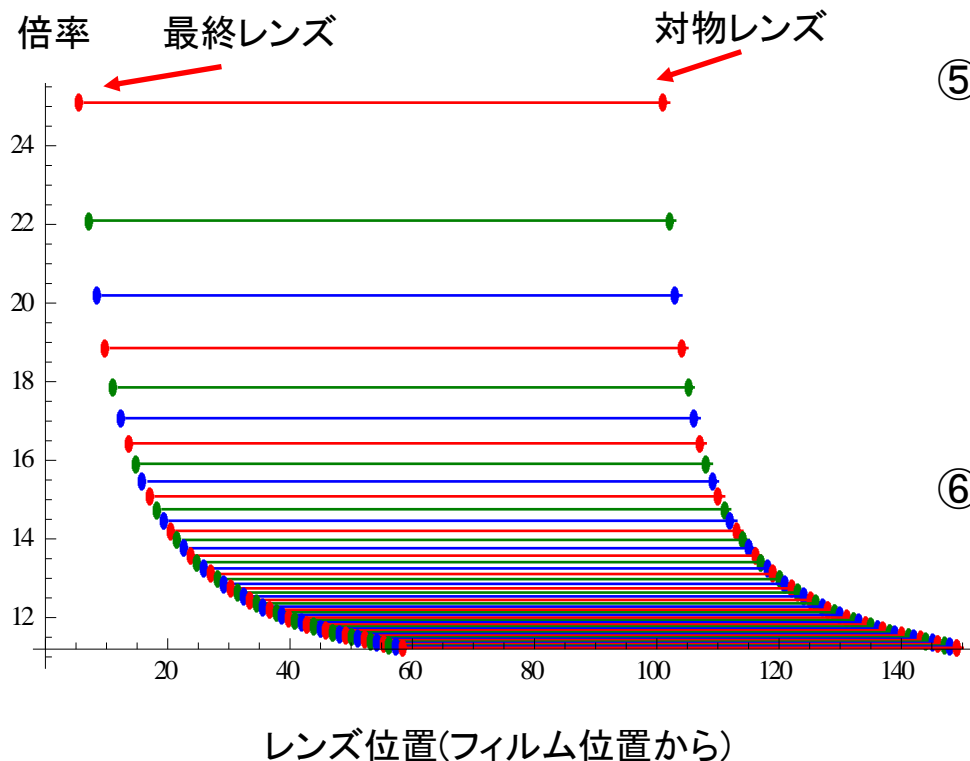


図3.2.3 高倍率のレンズ位置図
(上位49個)

⑤表3.2.3に示した結果をレンズ位置とともに表示したものが図3.2.3です。(上位49個)

前述④に示唆した様に、対物レンズと最終レンズの距離がほぼ一定であることが、本図より分ります。これは、この距離以外では、フィルム上に上手く結像しなくなるためです。

⑥ 3.1節とは異なり、凸・凹の組合せの方が凸・凸の組合せより光学倍率が約3倍程高くなるのは驚きでした。

3.3 2枚組各種凸・凸レンズの組合せ

(1) 2枚組各種凸・凸レンズの組合せ結果

対物レンズの焦点距離を変化させたときの2枚組レンズ凸・凸の組合せ結果を表3.3.1に示します。対物レンズの焦点距離が長い程、最大光学倍率が大きくなることが分かります。尚、焦点距離が長くなるに従って、レンズの最大可動距離Llimit を長くしました。

表3.3.1 各種凸・凸レンズの組合せ結果 (距離等の単位はmm)

		対物レンズ				最終レンズ				解析数		備考
No	最大光学倍率	焦点距離 (f1)	設定位置 (x1)	結像位置	像大きさ	焦点距離 (f3)	設定位置 (x3)	結像位置	像大きさ	解析総数	有効数	最大可動距離 Llimit
1	3.89	50	39.	-7.409	-0.0242	10	5.08	0.0035	-0.0099	87	40	100
2	8.24	100	92.	-7.240	-0.0505	10	5.07	0.0033	-0.0209	137	90	150
3	12.68	150	144.	-7.137	-0.0770	10	5.05	0.0032	-0.0320	187	140	200
4	16.92	200	196	-7.274	-0.1039	10	5.07	0.0033	-0.0429	237	190	250
5	22.21	250	249	-6.860	-0.1314	10	5.00	0.0031	-0.0556	332	283	345
6	44.87	500	520	-7.462	-0.2783	10	5.09	0.0035	-0.1142	537	453	550

(2) 2枚組各種凸・凸レンズの組合せ結果

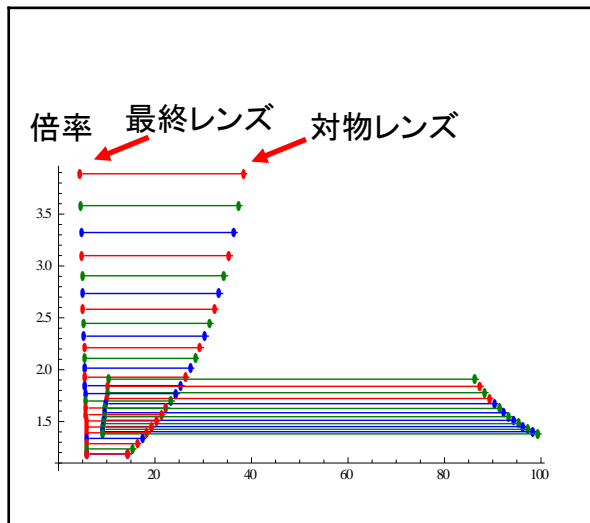


図3.3.1 凸 $f_1=50$, 凸 $f_2=10$

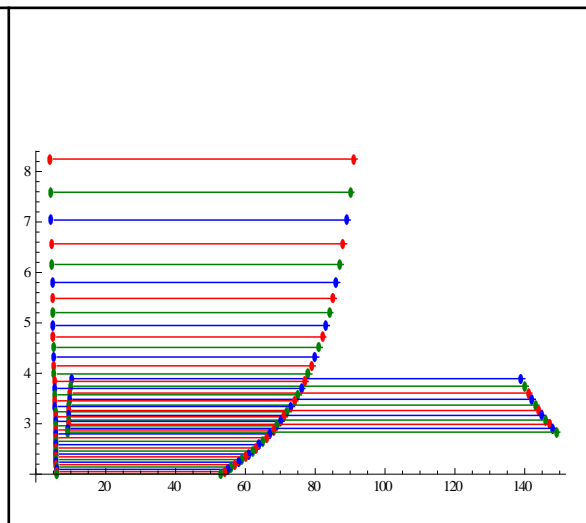


図3.3.2 凸 $f_1=100$, 凸 $f_2=10$

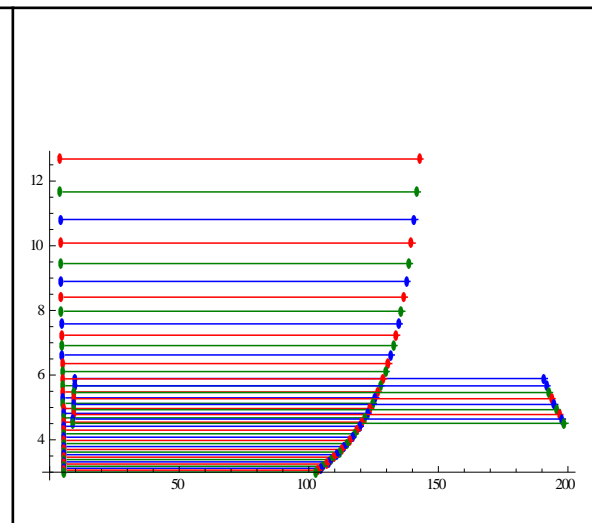


図3.3.3 凸 $f_1=150$, 凸 $f_2=10$

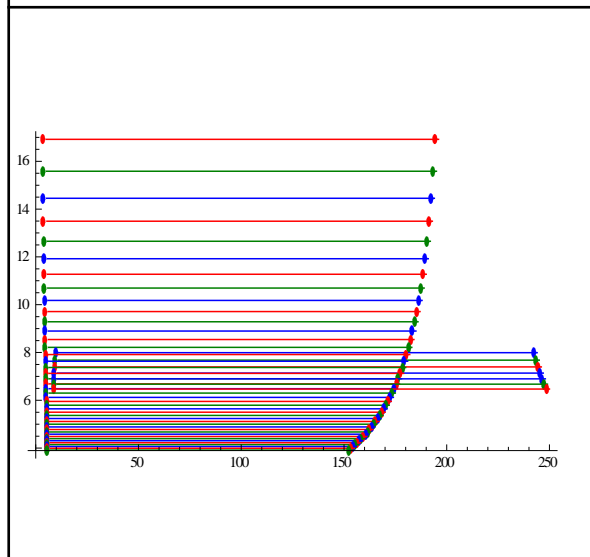


図3.3.4 凸 $f_1=200$, 凸 $f_2=10$

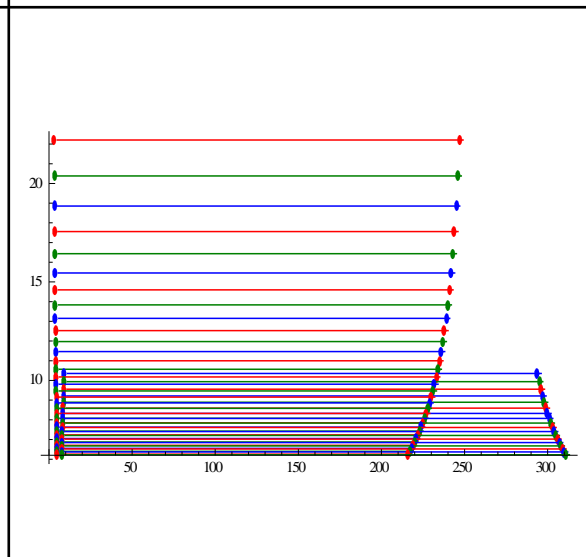


図3.3.5 凸 $f_1=250$, 凸 $f_2=10$

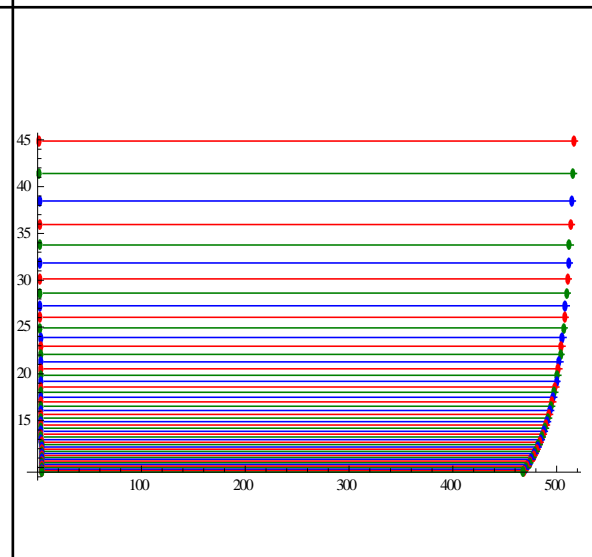


図3.3.6 凸 $f_1=500$, 凸 $f_2=10$

(3) 2枚組各種凸・凸レンズの組合せ考察

以下の知見を得ました。

- (1)対物レンズの可動領域が大きく、かつ、焦点距離が長くなれば、光学倍率は大きくなります。図3.3.6の場合、対物レンズの焦点距離は、500mmです。この焦点距離を生かすには、フィルムから対物レンズまでの距離が520mmを要します。結構な距離となります。
- (2)凸・凸レンズの場合、最終レンズに入光する様式は、収束光と拡散光の2種類が存在し、収束光として入る場合は、高倍率を与えます。
- (3)解析総数に比較して、光学倍率を計算する有効数が比較的多いと言えます。これは上記(2)に関連しますが、最終レンズが凸レンズの場合、収束光と拡散光の2種類の入射光をフィルム上に結像させることが可能なためです。これが凸・凹レンズの組合せと大きく違う点です。
- (4)図3.3.1～3.3.6に示す様に、最終レンズは殆ど移動せず、対物レンズが移動して光学倍率を変化させています。このため、光学倍率を変化させる(ズーム機能)には、対物レンズの位置を前後に移動させれば良いことが分かります。一方、微妙なピント合わせには、最終レンズを微調整すれば良いことが分かります。
- (5)凸・凸レンズの場合、焦点距離の長い1枚の対物レンズを用いれば、光学倍率を容易に変化させる(ズーム機能)ことが可能です。

3.4 2枚組各種凸・凹レンズの組合せ

(1) 2枚組各種凸・凹レンズの組合せ結果

対物レンズの焦点距離を変化させたときの2枚組レンズ凸・凹の組合せ結果を表3.4.1に示します。3.3節の結果と同様、対物レンズの焦点距離が長い程、最大光学倍率が大きくなるのが分かります。しかも、最終レンズに凹レンズを用いた方が、凸レンズを用いたよりも倍率が高くなることに驚きました。

尚、3.3節と同様、焦点距離が長くなるに従って、レンズの最大可動距離Llimit を長くしました。

表3.4.1 2枚組各種凸・凹レンズの組合せ結果 (距離等の単位はmm)

		対物レンズ				最終レンズ				解析数		備考
N	最大光学倍率	焦点距離 (f1)	設定位置 (x1)	結像位置	像大きさ	焦点距離 (f3)	設定位置 (x3)	結像位置	像大きさ	解析総数	有効数	最大可動距離 Llimit
1	12.36	50	49	2.591	-0.0242	-10	6.15	-0.0060	-0.0380	87	52	150
2	25.10	100	102	2.759	-0.0506	-10	6.42	-0.0059	-0.0807	137	49	150
3	37.64	150	154	2.861	-0.0771	-10	6.58	-0.0059	-0.1241	187	47	200
4	51.90	200	206	2.721	-0.1040	-10	6.36	-0.0059	-0.1653	237	45	250
5	73.14	250	258	2.134	-0.1315	-10	5.37	-0.0060	-0.1968	332	88	345
6	143.91	500	530	2.508	-0.2786	-10	6.01	-0.0060	-0.4337	537	21	550

(2) 2枚組各種凸・凹レンズの組合せ

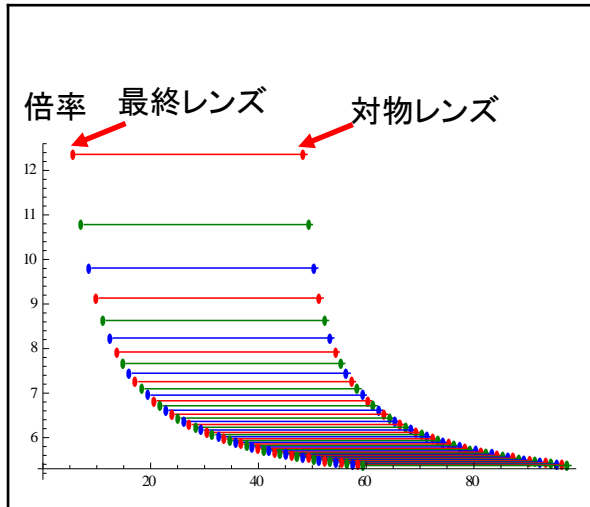


図3.4.1 凸 $f_1=50$, 凸 $f_2=-10$

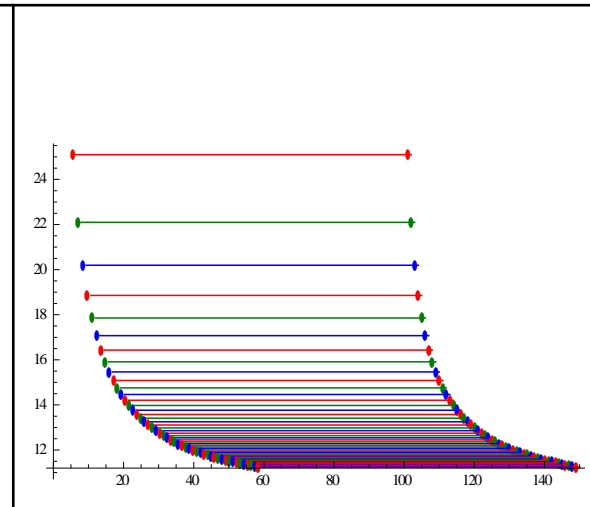


図3.4.2 凸 $f_1=100$, 凸 $f_2=-10$

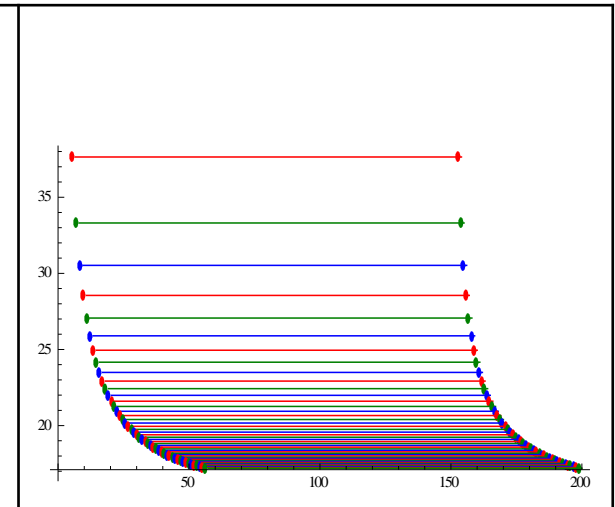


図3.4.3 凸 $f_1=150$, 凸 $f_2=-10$

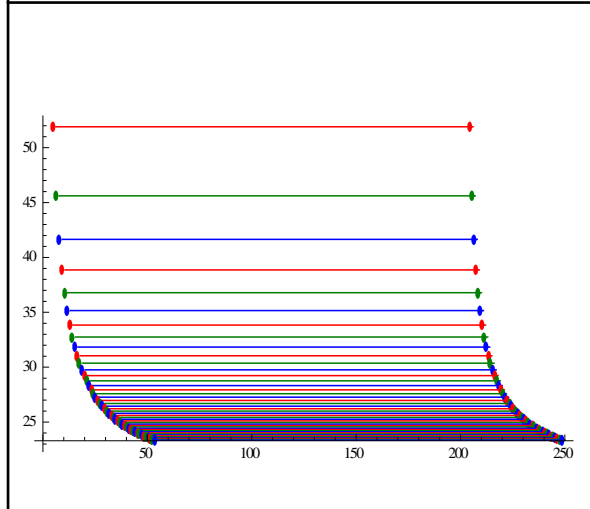


図3.4.4 凸 $f_1=200$, 凸 $f_2=-10$

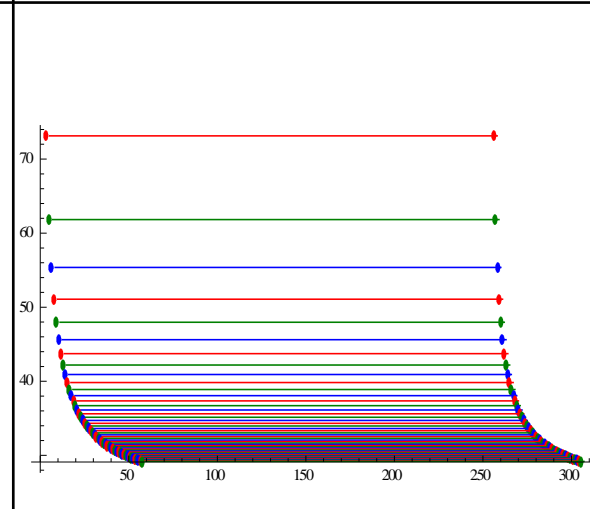


図3.4.5 凸 $f_1=250$, 凸 $f_2=-10$

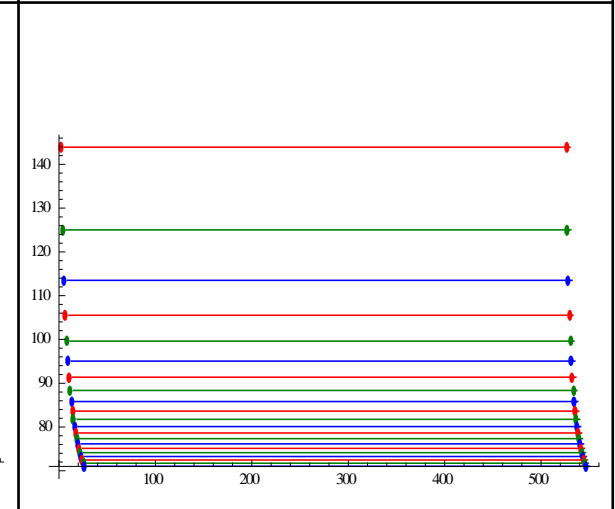


図3.4.6 凸 $f_1=500$, 凸 $f_2=-10$

(3) 2枚組各種凸・凹レンズの組合せ考察

以下の知見を得ました。

- (1) 前述3.3節と同様、対物レンズの可動領域が大きく、かつ、焦点距離が長くなれば、光学倍率は大きくなります。図3.4.6の場合、対物レンズの焦点距離は、500mmです。この焦点距離を生かすには、フィルムから対物レンズまでの距離が530mmを要します。結構な距離となります。
- (2) 凸・凹レンズの場合、最終レンズに入光する様式は収束光のみとなるため、解析総数に比較して、光学倍率を計算する有効数が極端に少なくなります。これは凸・凹レンズの組合せの特徴と考えられます。
- (3) 前述3.3節と異なり、凸・凹レンズの場合、光学倍率を変化させる(ズーム機能)には、対物レンズと最終レンズ間の距離を一定範囲に保持することが必要となります。そのため、凸・凸レンズの場合と比較して、レンズ駆動方式に差が生じてきます。
- (4) 凸・凸レンズの場合と比較して、光学倍率が高いこと(約3倍)が分かりました。

4. 3枚組各種レンズの組合せ

4.1 検討課題

前章では、2枚組レンズについて検討し、種々の知見を得ました。その中の大事な知見として、高倍率を得るためには、対物レンズの焦点距離が長く、かつ、フィルムから対物レンズまでの距離が長いことが必要とされました。

例えば、凸・凸レンズの場合で、対物レンズの焦点距離が500mmのとき、この焦点距離を生かすには、フィルムから対物レンズまでの距離が520mmを要します。結構な距離となります。

それでは、対物レンズの焦点距離が500mmで、フィルムから対物レンズまでの距離が半分の250mmでは駄目なのかを検討しました。その結果が図4.1に示すものです。

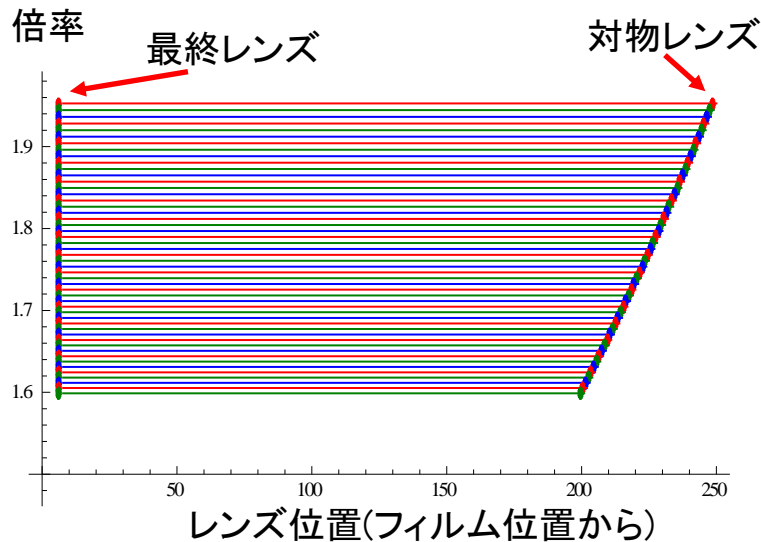


図4.1 凸 $f_1=500$, 凸 $f_2=10$ の場合の光学倍率とレンズ位置

左図4.1に示す様に、対物レンズの可動域 L_{limit} を半分にするると倍率は1.95となり、本来の $L_{limit}=520\text{mm}$ の場合の倍率44.87倍に較べてまったく仕様に堪えません。この様な設計ミスはしないものと思います。

このため、本章では対物レンズの焦点距離を短くし、かつ、フィルムから対物レンズまでの距離を短くする3枚組のレンズの組合せを検討します。

4.2 3枚組凸・凸・凸レンズの解析

本節では、凸・凸・凸レンズの組合せの特徴を把握するため、種々の対物レンズの焦点距離について検討します。検討結果を表4.2.1に示します。

表4.2.1 3枚組凸・凸・凸レンズの解析結果

No.	最大光学倍率	結像の大きさ	対物レンズ		中間レンズ		最終レンズ		備考			
			焦点距離	位置	焦点距離	位置	焦点距離	位置	可動距離	参考図	解析総数	有効数
1	2.93	0.0165	50	80	50	16	10	11.18	100	図4.2.1	3007	767
2	6.02	0.0336	100	133	50	16	10	11.13	150	図4.2.2	8518	2359
3	9.11	0.0506	150	185	50	16	10	11.10	200	図4.2.3	16474	4822
4	12.40	0.0693	200	237	50	16	10	11.16	250	図4.2.4	26800	7802
5	15.92	0.0890	250	289	50	15	10	11.16	345	図4.2.5	53631	16821

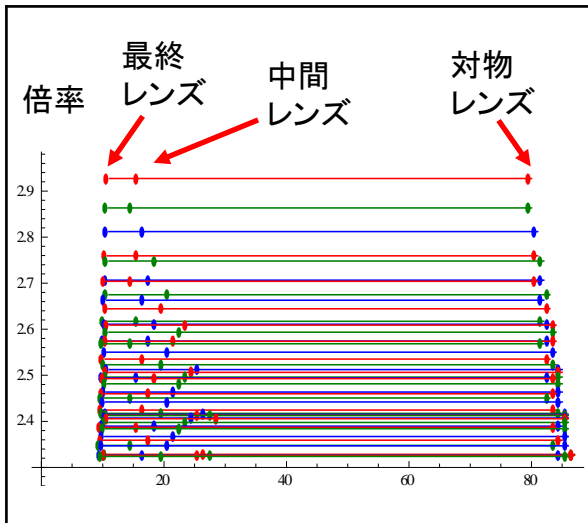


図4.21 凸 $f_1=50$, 凸 $f_2=50$, 凸 $f_3=10$

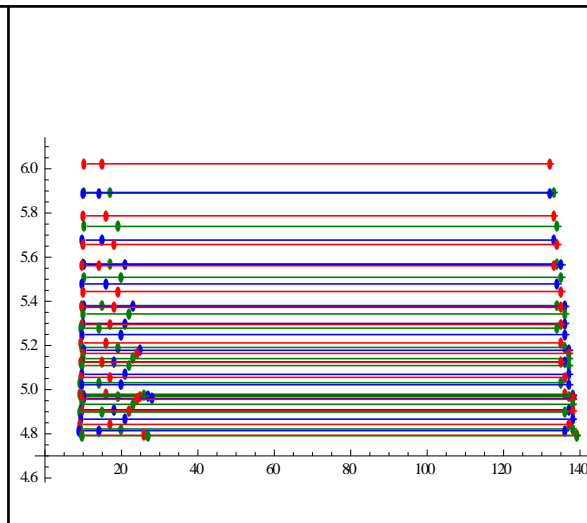


図4.22 凸 $f_1=100$, 凸 $f_2=50$, 凸 $f_3=10$

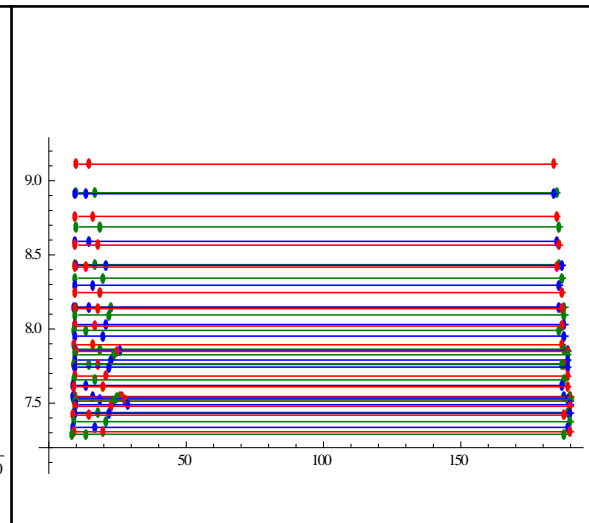


図4.23 凸 $f_1=150$, 凸 $f_2=50$, 凸 $f_3=10$

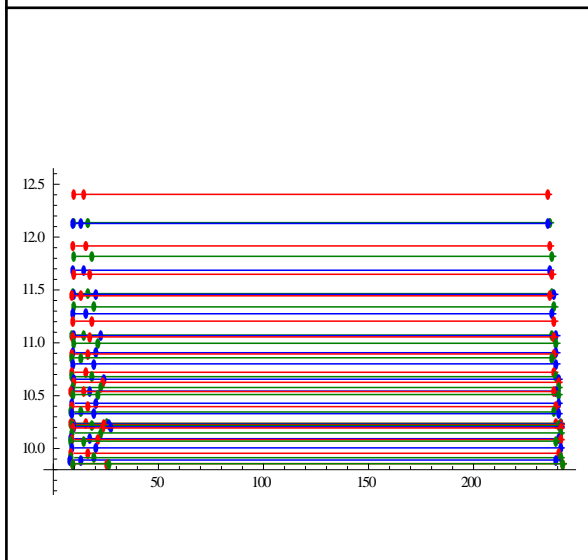


図4.24 凸 $f_1=200$, 凸 $f_2=50$, 凸 $f_3=10$

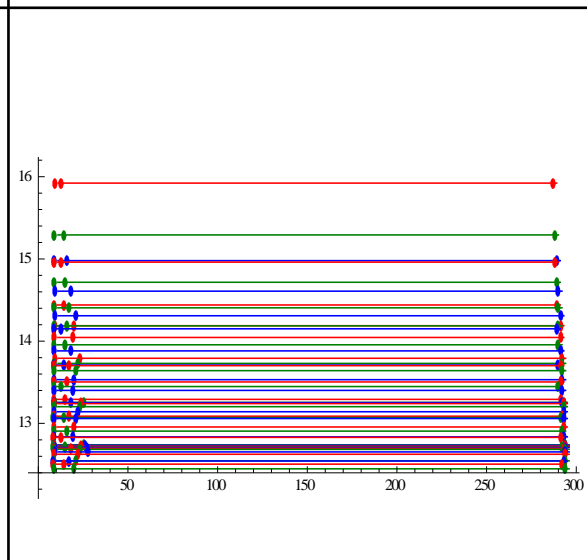


図4.25 凸 $f_1=250$, 凸 $f_2=50$, 凸 $f_3=10$

4.2.2 3枚組凸・凸・凸レンズの考察

- ① 表4.2.1と前述表3.3.1を比較すると、2枚組レンズの方が倍率も高く、かつ、ズーム機能も持ち合わせていました。一方、3枚組レンズの方は、ズーム機能も失ってしまいました。
- ② 中間レンズの焦点距離の設定がおかしかったのか、全てのケースにおいて、中間レンズは最終レンズの近傍に位置しました。これは最終レンズに収束光として入射させるため、なるべく中間レンズと最終レンズの距離を縮めた結果です。
- ③ 今回の検討の結果、3枚組凸・凸・凸レンズの組合せは、望遠カメラとして使用不可であることが分かりました。

4.3 3枚組凸・凹・凸レンズの解析

本節では、凸・凹・凸レンズの組合せの特徴を把握するため、種々の対物レンズの焦点距離について検討します。検討結果を表4.3.1に示します。

表4.3.1 3枚組凸・凹・凸レンズの解析結果

No.	最大光学倍率	結像の大きさ	対物レンズ		中間レンズ		最終レンズ		備考			
			焦点距離	位置	焦点距離	位置	焦点距離	位置	可動距離	参考図	解析総数	有効数
1	10.88	-0.0274	50	94	-50	79	10	5.05	100	図4.3.1	3162	1555
2	21.63	-0.0543	100	140	-50	71	10	5.02	150	図4.3.2	8778	5020
3	34.15	-0.0861	150	197	-50	77	10	5.04	200	図4.3.3	16836	7792
4	46.33	-0.1169	200	250	-50	78	10	5.04	250	図4.3.4	27263	10414
5	75.41	-0.1925	250	342	-50	122	10	5.10	345	図4.3.5	53958	18326

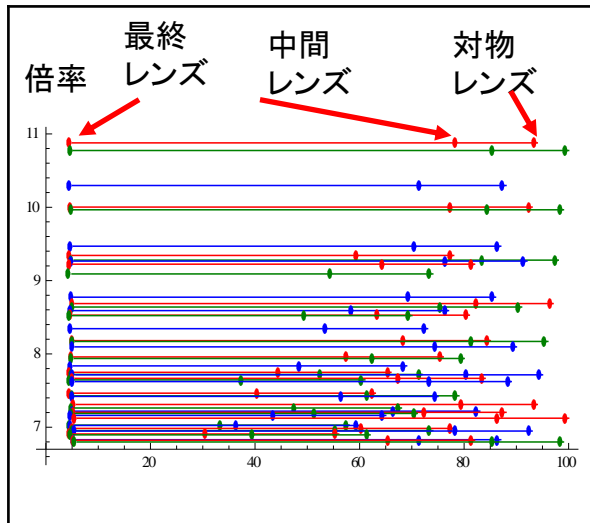


図4.3.1 凸 $f_1=50$, 凸 $f_2=-50$, 凸 $f_3=10$

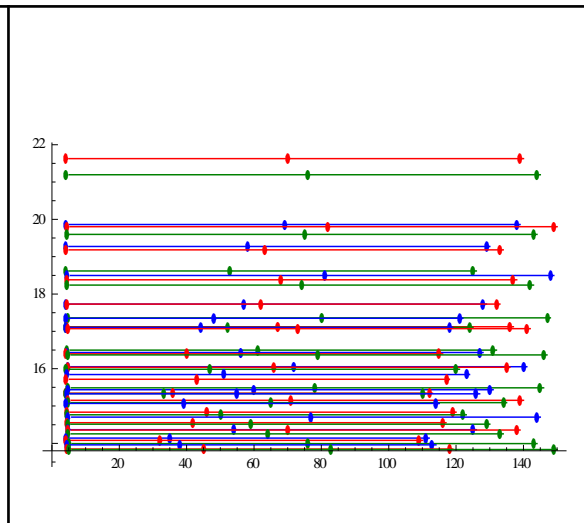


図4.3.2 凸 $f_1=100$, 凸 $f_2=-50$, 凸 $f_3=10$

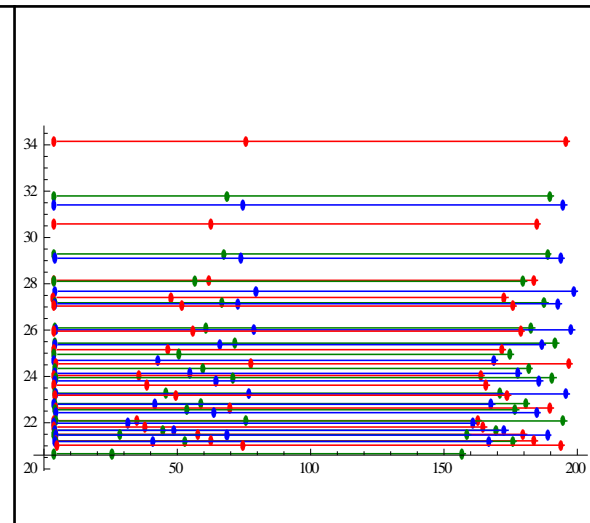


図4.3.3 凸 $f_1=150$, 凸 $f_2=-50$, 凸 $f_3=10$

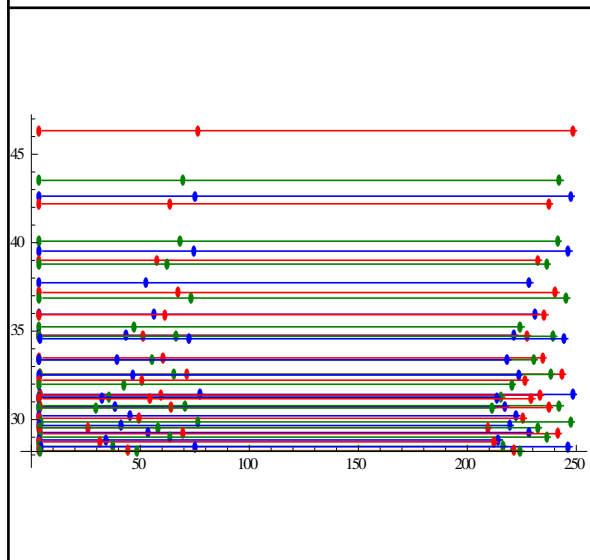


図4.3.4 凸 $f_1=200$, 凸 $f_2=-50$, 凸 $f_3=10$

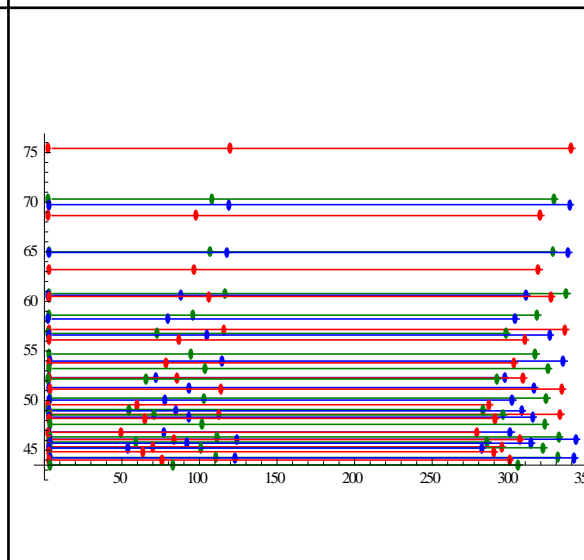


図4.3.5 凸 $f_1=250$, 凸 $f_2=-50$, 凸 $f_3=10$

4.3.2 3枚組凸・凹・凸レンズの考察

- ① 表4.3.1と前述表3.4.1を比較すると、2枚組レンズの方が若干倍率も高く、かつ、ズーム機能も持ち合わせていました。一方、3枚組レンズの方は、明確なズーム機能は見られませんでした。
- ② 所期の目的であった焦点距離が短く、かつ、フィルムから対物レンズまでの距離を短くする3枚組のレンズの組合せについては、目的が達成出来ませんでした。(2枚組レンズの方がシンプルで、若干倍率も高く、かつ、ズーム機能も持ち合わせていました。)

5. 3枚組凸・凸・凹レンズ及び凸・凹・凹レンズの解析

5.1 序

前章までの解析結果、凸・凸・凸レンズ及び凸・凹・凸レンズの組合せでは、2枚組のレンズ組合せの光学倍率を凌ぐことは出来ないという事が分かりました。

望遠カメラとして、対物レンズには次段のレンズへ収束光を入射させる目的が有るため、凸レンズである必要が有ります。(対物レンズに凹レンズを使用した場合、最終レンズでの像は小さくなります。これは望遠鏡を反対に見たときに被写体が小さく見えるので体験済みと思います。)

3枚組の内、凸・凸・凹レンズ及び凸・凹・凹レンズの組合せが残っていることが分かり、疑心暗鬼で色々試行錯誤した結果、これらの組合せが、対物レンズ-フィルム間距離(Llimit)が短く、かつ、高倍率を生成させることが分かりました。

このため、5.2節にて凸・凸・凹レンズの結果、5.3節にて凸・凹・凹レンズの結果について説明致します。

5.2 3枚組凸・凸・凹レンズの解析

5.2.1項にて凸50-凸(*)-凹(-10)、5.2.2項にて凸100-凸(*)-凹(-10)、5.2.3項にて凸150-凸(*)-凹(-10)の組合せについて、説明します。(*は色々変化することを示します)

5.2.1 3枚組凸($f_1=50$)・凸($f_2=*$)・凹($f_3=-10$)レンズの解析

表5.2.1 3枚組凸($f_1=50$)・凸($f_2=*$)・凹($f_3=-10$)レンズの解析結果

No.	最大光学倍率	結像の大きさ	対物レンズ		中間レンズ		最終レンズ		備考			
			焦点距離	位置	焦点距離	位置	焦点距離	位置	可動距離	参考図	解析総数	有効数
1	9.58	-0.0282	50	46	50	15	-10	5.87	100	図5.2.1-1	3007	1671
2	11.86	-0.0298	50	46	100	18	-10	5.02	100	図5.2.1-2	3162	1773
3	12.70	-0.0338	50	48	200	15	-10	5.32	100	図5.2.1-3	3162	1735
4	13.54	-0.0345	50	48	500	15	-10	5.08	100	図5.2.1-4	3162	1688
5	13.71	-0.0348	50	48	1000	23	-10	5.07	100	図5.2.1-5	3240	1722
6	13.96	-0.0350	50	48	3000	35	-10	5.01	100	図5.2.1-6	3240	1707

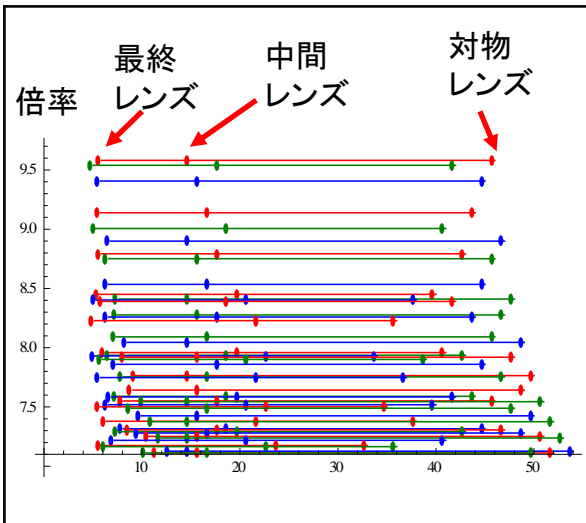


図5.2.1-1 凸f1=50, 凸f2=50, 凸f3=-10

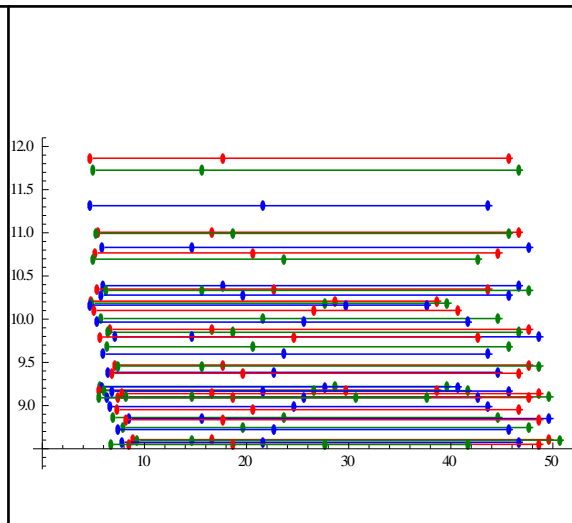


図5.2.1-2 凸f1=50, 凸f2=100, 凸f3=-10

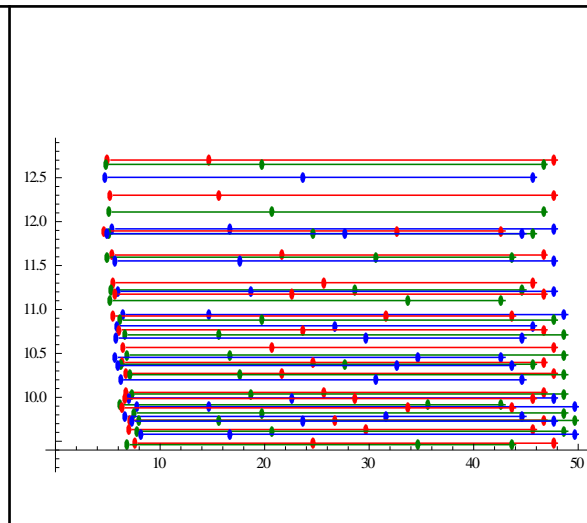


図5.2.1-3 凸f1=50, 凸f2=200, 凸f3=-10

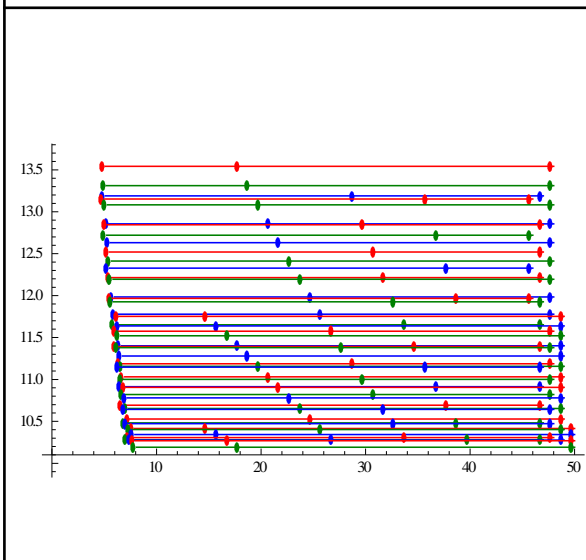


図5.2.1-4 凸f1=50, 凸f2=500, 凸f3=-10

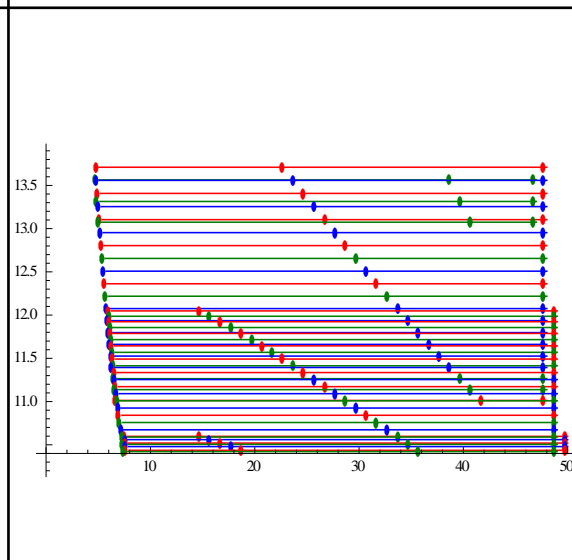


図5.2.1-5 凸f1=50, 凸f2=1000, 凸f3=-10

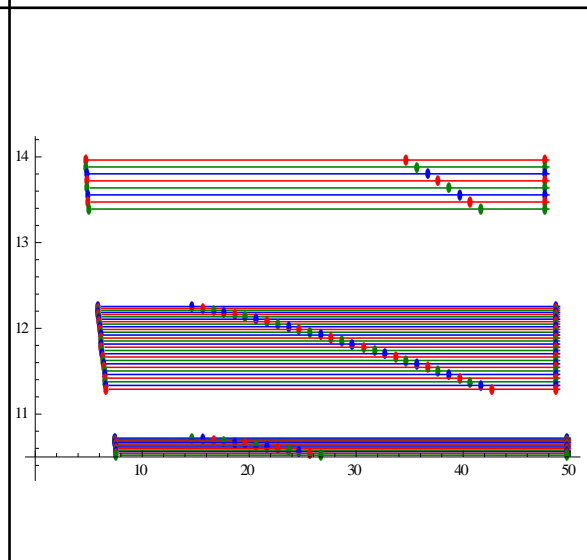


図5.2.1-6 凸f1=50, 凸f2=3000, 凸f3=-10

5.2.2 3枚組凸($f_1=100$)・凸($f_2=*$)・凹($F_3=-10$)レンズの解析

表5.2.2 3枚組凸($f_1=100$)・凸($f_2=*$)・凹($F_3=-10$)レンズの解析結果

No.	最大光学倍率	結像の大きさ	対物レンズ		中間レンズ		最終レンズ		備考			
			焦点距離	位置	焦点距離	位置	焦点距離	位置	可動距離	参考図	解析総数	有効数
1	21.71	-0.0553	100	98	50	15	-10	5.08	150	図5.2.2-1	8518	6479
2	25.46	-0.0648	100	100	100	15	-10	5.08	150	図5.2.2-2	8648	5900
3	26.73	-0.0680	100	100	200	19	-10	5.08	150	図5.2.2-3	8778	5382
4	28.53	-0.0722	100	101	500	15	-10	5.06	150	図5.2.2-4	8778	4822
5	28.91	-0.0729	100	101	1000	18	-10	5.03	150	図5.2.2-5	8778	4588
6	29.27	-0.0733	100	101	3000	26	-10	5.00	150	図5.2.2-6	8778	4413

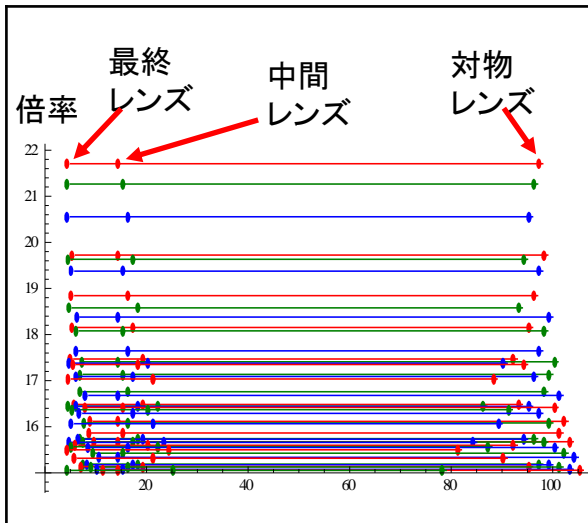


図5.2.2-1 凸f1=100, 凸f2=50, 凹f3=-10

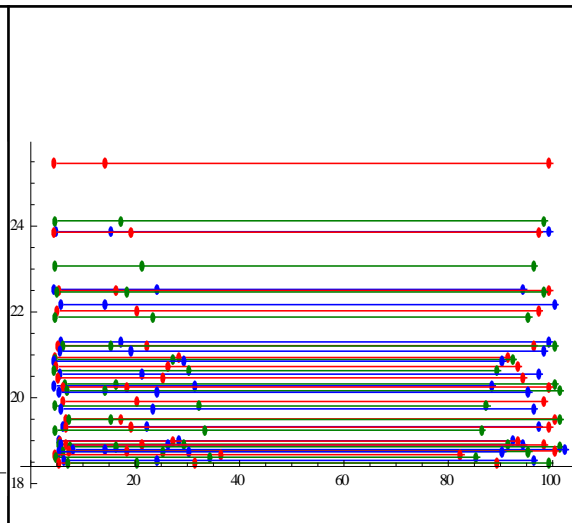


図5.2.2-2 凸f1=100, 凸f2=100, 凹f3=-10

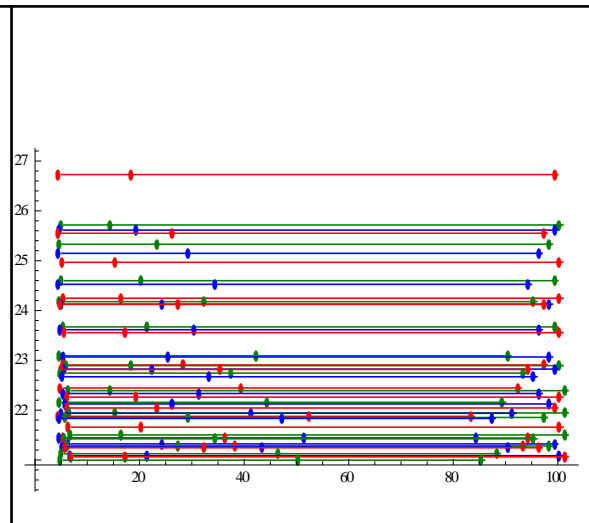


図5.2.2-3 凸f1=100, 凸f2=200, 凹f3=-10

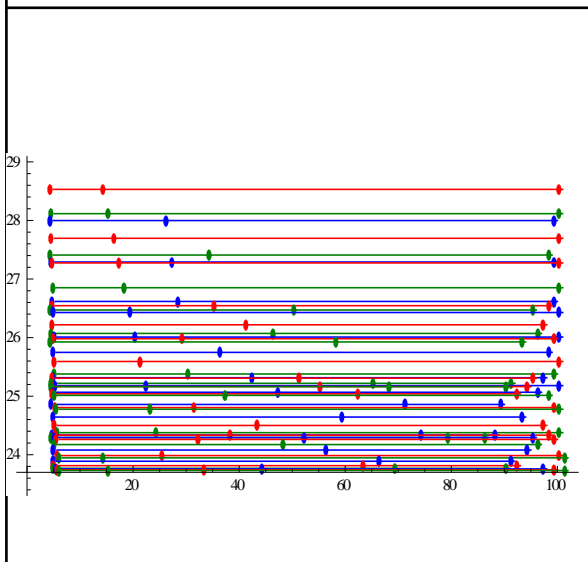


図5.2.2-4 凸f1=100, 凸f2=500, 凹f3=-10

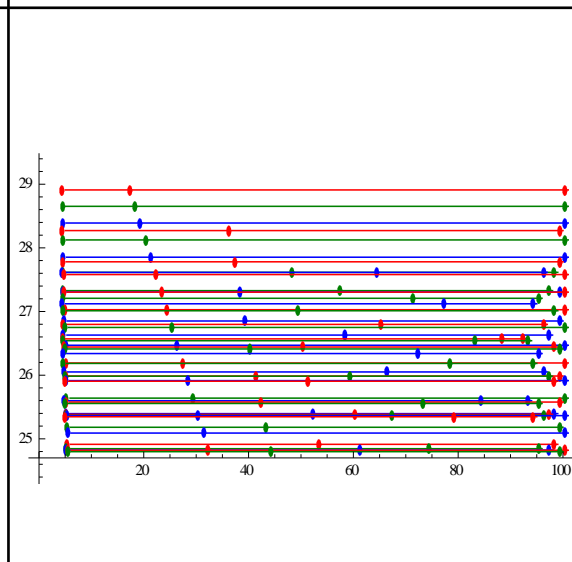


図5.2.2-5 凸f1=100, 凸f2=1000, 凹f3=-10

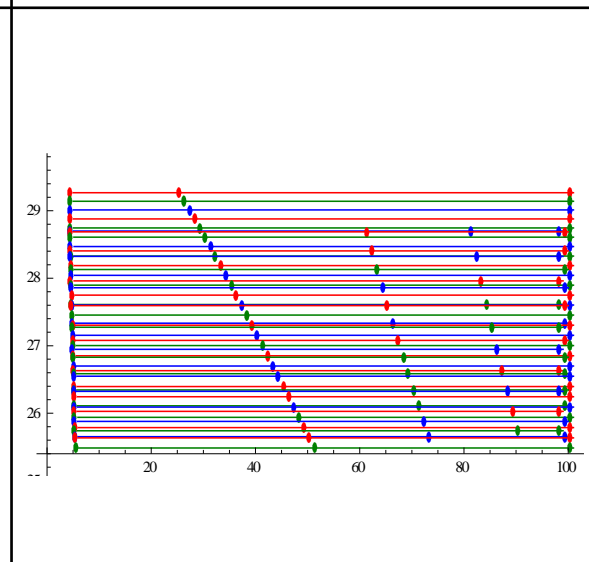


図5.2.2-6 凸f1=100, 凸f2=3000, 凹f3=-10

5.2.3 3枚組凸($f_1=150$)・凸($f_2=*$)・凹($f_3=-10$)レンズの解析

表5.2.3 3枚組凸($f_1=150$)・凸($f_2=*$)・凹($f_3=-10$)レンズの解析結果

No.	最大光学倍率	結像の大きさ	対物レンズ		中間レンズ		最終レンズ		備考			
			焦点距離	位置	焦点距離	位置	焦点距離	位置	可動距離	参考図	解析総数	有効数
1	32.69	-0.0848	150	150	50	15	-10	5.18	200	図5.23-1	16474	13362
2	38.13	-0.0997	150	152	100	15	-10	5.22	200	図5.2.3-2	16655	11774
3	39.93	-0.1047	150	152	200	19	-10	5.23	200	図5.2.3-3	16836	10190
4	42.78	-0.1072	150	152	500	26	-10	5.00	200	図5.2.3-4	16836	8445
5	44.04	-0.1115	150	153	1000	15	-10	5.06	200	図5.2.3-5	1836	7641
6	44.63	-0.1120	150	153	3000	19	-10	5.01	200	図5.2.3-6	16836	7016

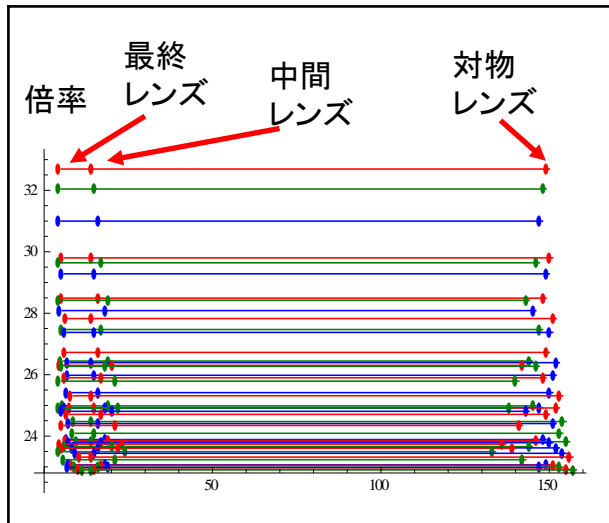


図5.2.3-1 凸f1=150, 凸f2=50, 凹f3=-10

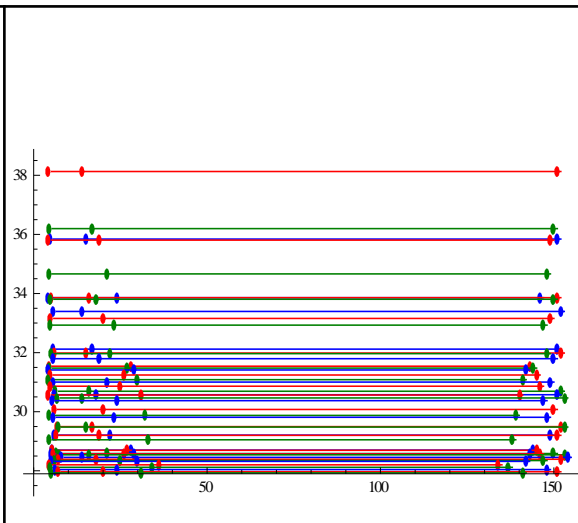


図5.2.3-2 凸f1=150, 凸f2=100, 凹f3=-10

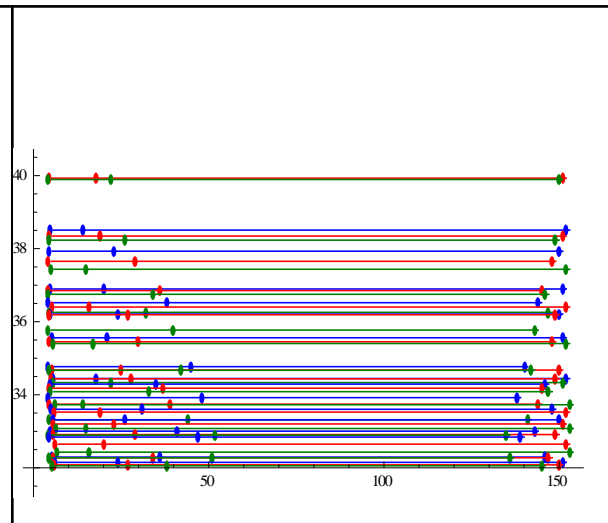


図5.2.3-3 凸f1=150, 凸f2=200, 凹f3=-10

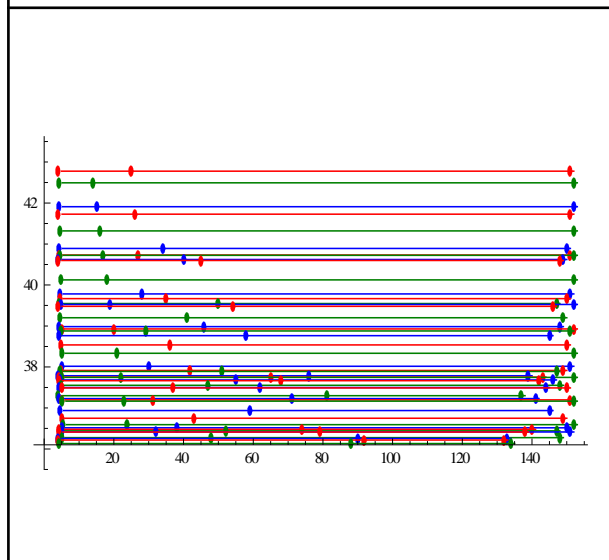


図5.2.3-4 凸f1=150, 凸f2=500, 凹f3=-10

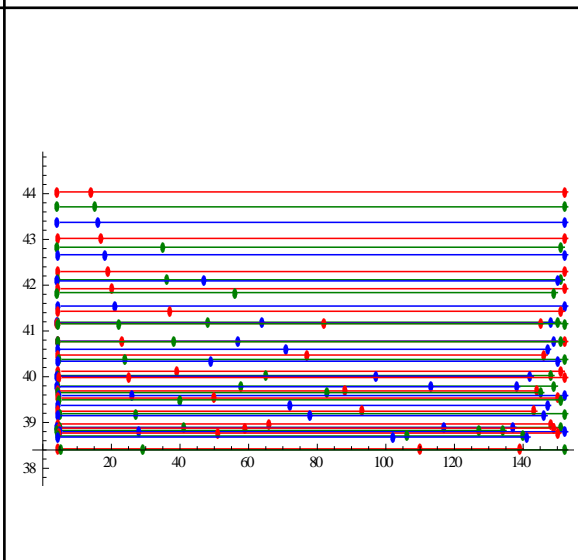


図5.2.3-5 凸f1=150, 凸f2=1000, 凹f3=-10

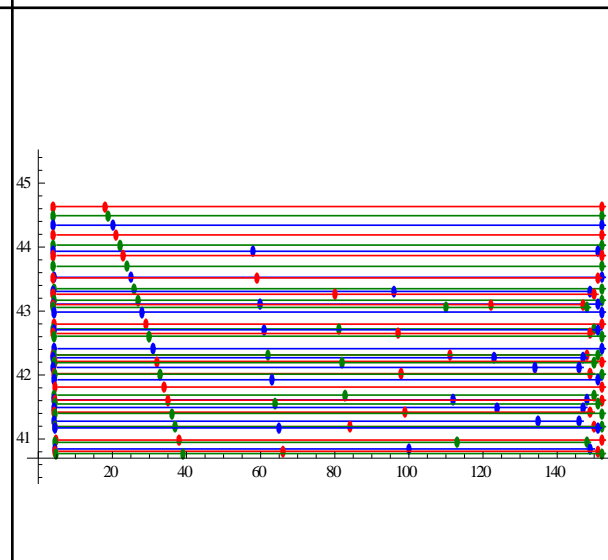


図5.2.3-6 凸f1=150, 凸f2=3000, 凹f3=-10

5.2 3枚組凸・凸・凹レンズの考察

- ① 結果を表5.2.1、表5.2.2、表5.2.3及び図5.2.1-1～5.2.1-6、図5.2.2-1～5.2.2-6、図5.2.3-1～5.2.3-6に示しました。
- ② 2枚組凸・凹のレンズの倍率に較べて、中間レンズに対物レンズの焦点距離以上の焦点距離を用いると、対物レンズ-フィルム間距離 L_{limit} (可動距離)が短くても、高倍率が得られることが分かりました。
- ③ 中間レンズの焦点距離が長い程、高倍率となり、特に500mm以上の凸レンズを用いると、明確なズーム機能を持つことが分かりました。
- ④ 中間レンズの焦点距離を3000mmに設定した場合、光学倍率の図5.2.1-6が離散的になっていますが、これは数値解析上、レンズを1mm毎に移動しているためで、これを0.5mmに変更すると連続的に変化するものと思われれます。

5.3 3枚組凸・凹・凹レンズの解析

前節と同様、5.3.1項にて凸50-凹(*)-凹(-10)、5.3.2項にて凸100-凹(*)-凹(-10)、5.3.3項にて凸150-凹(*)-凹(-10)の組合せについて、説明します。

5.3.1 3枚組凸($f_1=50$)・凹($f_2=-*$)・凹($f_3=-10$)レンズの解析

表5.3.1 3枚組凸($f_1=50$)・凹($f_2=-*$)・凹($f_3=-10$)レンズの解析結果

No.	最大光学倍率	結像の大きさ	対物レンズ		中間レンズ		最終レンズ		備考			
			焦点距離	位置	焦点距離	位置	焦点距離	位置	可動距離	参考図	解析総数	有効数
1	89.01	-0.2364	50	98	-10	60	-10	5.30	100	図5.3.1-1	3162	150
2	48.86	-0.1321	50	88	-20	56	-10	5.40	100	図5.3.1-2	3162	343
3	41.95	-0.1159	50	94	-30	68	-10	5.52	100	図5.3.1-3	3162	529
4	33.63	-0.1065	50	95	-40	74	-10	6.32	100	図5.3.1-4	3162	702
5	32.68	-0.0893	50	92	-50	75	-10	5.46	100	図5.3.1-5	3162	864
6	22.31	-0.0602	50	75	-100	68	-10	5.39	100	図5.3.1-6	3162	1377

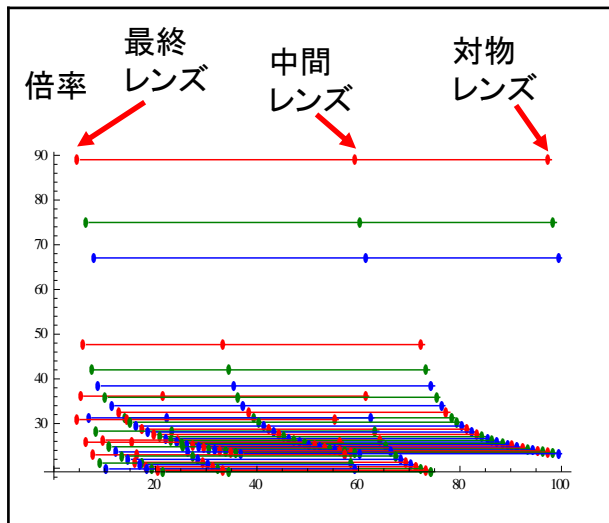


図5.3.1-1 凸 $f_1=50$, 凹 $f_2=-10$, 凹 $f_3=-10$

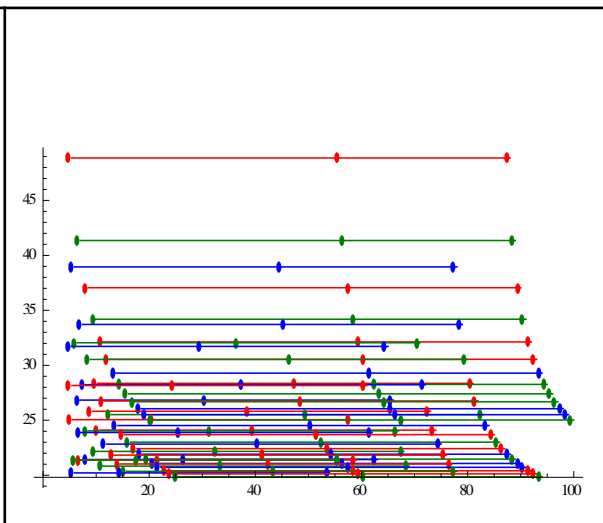


図5.3.1-2 凸 $f_1=50$, 凹 $f_2=-20$, 凹 $f_3=-10$

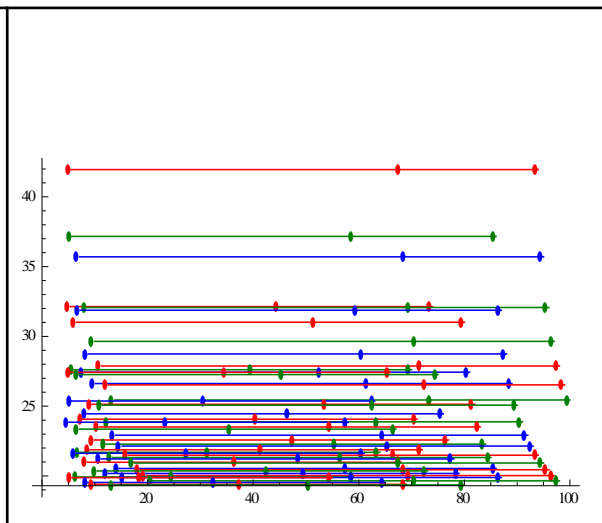


図5.3.1-3 凸 $f_1=50$, 凹 $f_2=-30$, 凹 $f_3=-10$

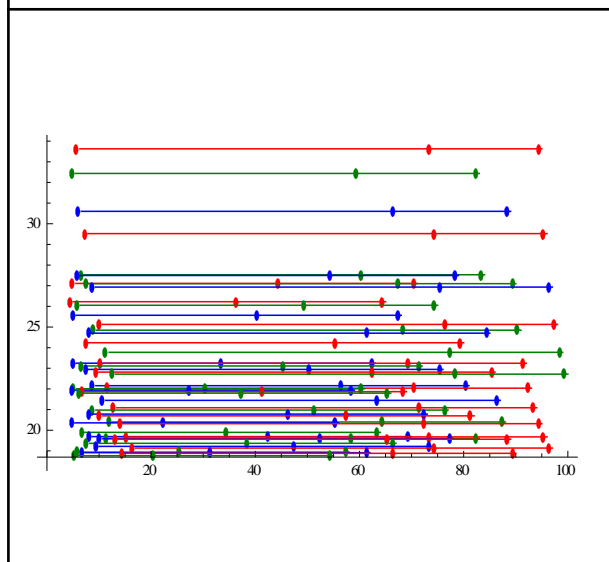


図5.3.1-4 凸 $f_1=50$, 凹 $f_2=-40$, 凹 $f_3=-10$

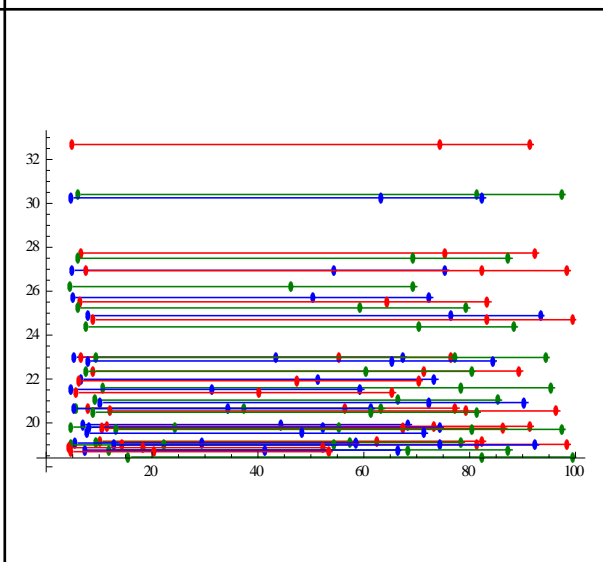


図5.3.1-5 凸 $f_1=250$, 凹 $f_2=-50$, 凹 $f_3=-10$

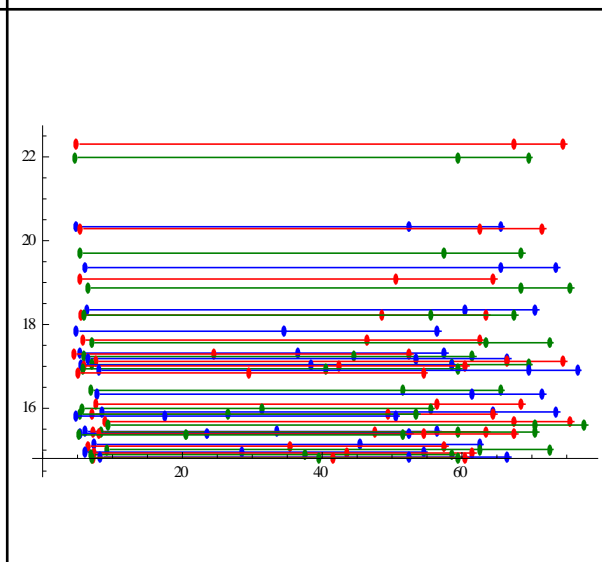


図5.3.1-6 凸 $f_1=250$, 凹 $f_2=-100$, 凹 $f_3=-10$

5.3.2 3枚組凸($f_1=100$)・凹($f_2=-*$)・凹($f_3=-10$)レンズの解析

表5.3.2 3枚組凸($f_1=100$)・凹($f_2=-*$)・凹($f_3=-10$)レンズの解析結果

No.	最大光学倍率	結像の大きさ	対物レンズ		中間レンズ		最終レンズ		備考			
			焦点距離	位置	焦点距離	位置	焦点距離	位置	可動距離	参考図	解析総数	有効数
1	147.18	-0.4776	100	145	-10	54	-10	6.47	150	図5.3.2-1	8778	136
2	94.39	-0.2739	100	139	-20	54	-10	5.79	150	図5.3.2-2	8778	320
3	91.48	-0.2301	100	145	-30	66	-10	5.02	150	図5.3.2-3	8778	490
4	78.75	-0.2047	100	146	-40	72	-10	5.19	150	図5.3.2-4	8778	649
5	73.20	-0.1913	100	149	-50	80	-10	5.22	150	図5.3.2-5	8778	801
6	57.96	-0.1473	100	150	-100	100	-10	5.07	150	図5.3.2-6	8778	1402

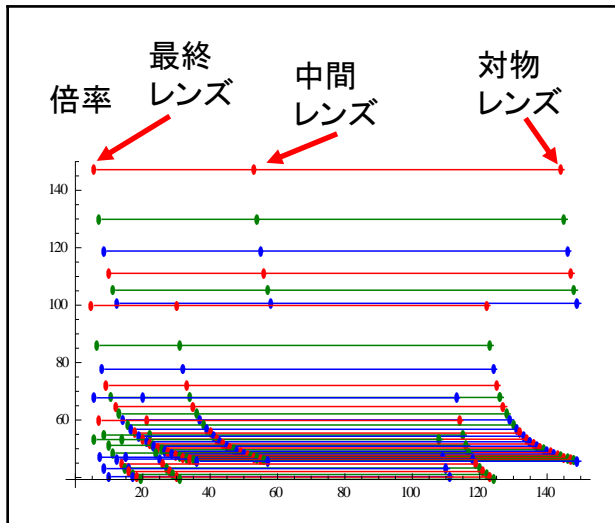


図5.3.2-1 凸 $f_1=100$, 凹 $f_2=-10$, 凹 $f_3=-10$

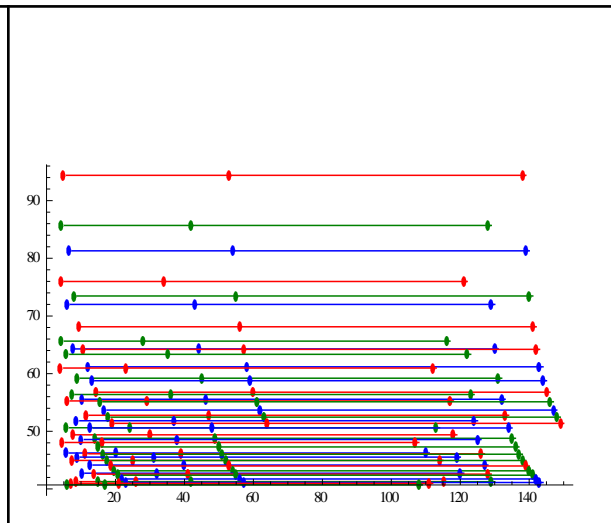


図5.3.2-2 凸 $f_1=100$, 凹 $f_2=-20$, 凹 $f_3=-10$

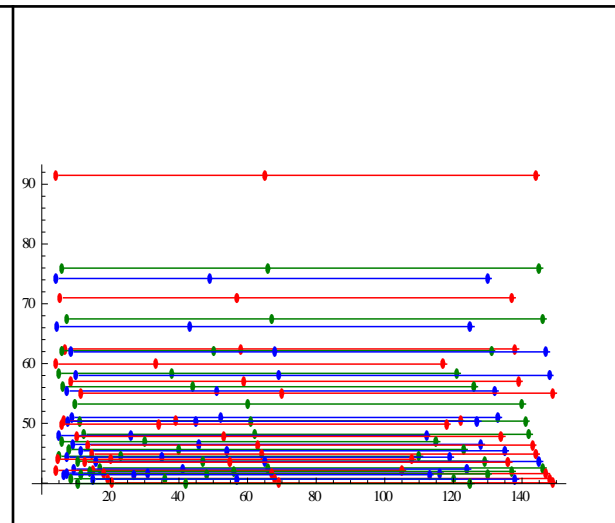


図5.3.2-3 凸 $f_1=100$, 凹 $f_2=-30$, 凹 $f_3=-10$

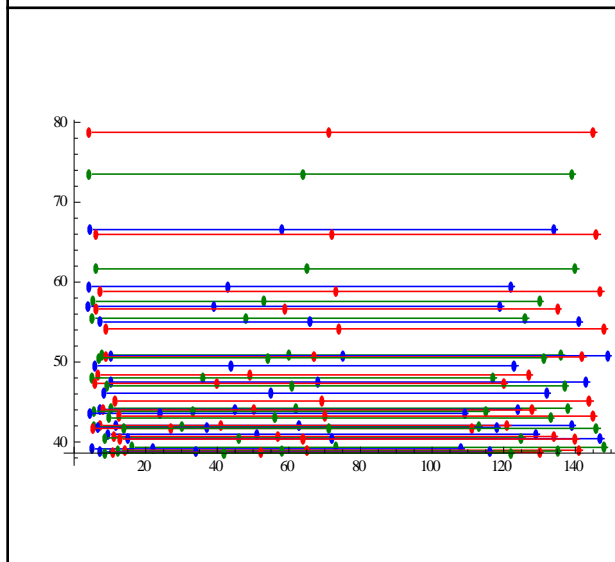


図5.3.2-4 凸 $f_1=100$, 凹 $f_2=-40$, 凹 $f_3=-10$

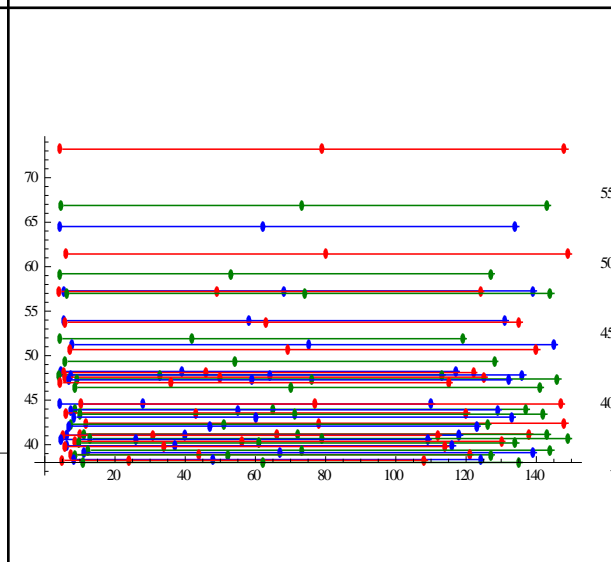


図5.3.2-5 凸 $f_1=100$, 凹 $f_2=-50$, 凹 $f_3=-10$

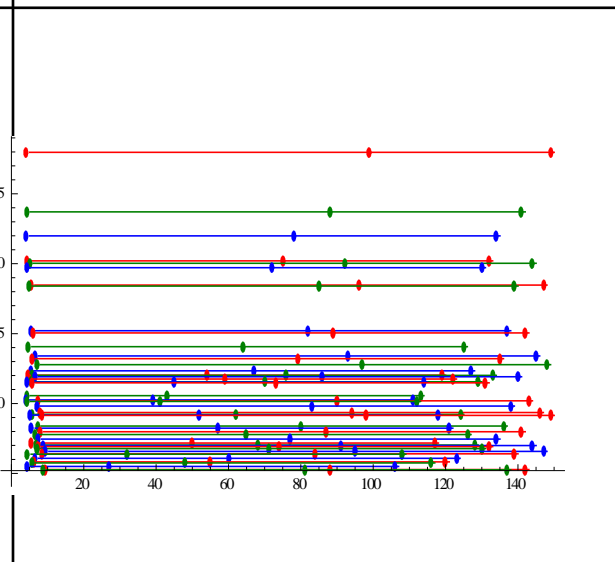


図5.3.2-6 凸 $f_1=100$, 凹 $f_2=-100$, 凹 $f_3=-10$

5.3.3 3枚組凸($f_1=150$)・凹($f_2=-*$)・凹($f_3=-10$)レンズの解析

表5.3.3 3枚組($f_1=150$)・凹($f_2=-*$)・凹($f_3=-10$)レンズの解析結果

No.	最大光学倍率	結像の大きさ	対物レンズ		中間レンズ		最終レンズ		備考			
			焦点距離	位置	焦点距離	位置	焦点距離	位置	可動距離	参考図	解析総数	有効数
1	241.72	-0.6392	150	193	-10	50	-10	5.25	200	図5.3.3-1	16836	129
2	136.12	-0.4190	150	190	-20	53	-10	6.14	200	図5.3.3-2	16836	302
3	115.60	-0.3826	150	197	-30	66	-10	6.60	200	図5.3.3-3	16836	461
4	103.90	-0.3341	150	198	-40	72	-10	6.42	200	図5.3.3-4	16836	614
5	94.00	-0.2729	150	191	-50	68	-10	5.79	200	図5.3.3-5	16836	749
6	82.50	-0.2247	150	199	-100	96	-10	5.44	200	図5.3.3-6	16836	1326

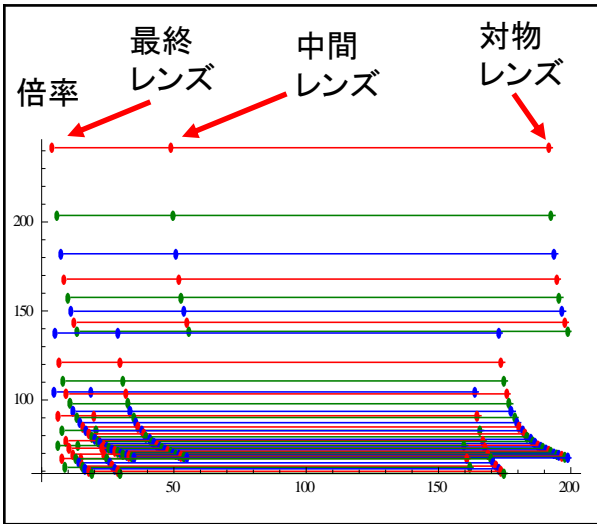


図5.3.3-1 凸 $f_1=150$, 凹 $f_2=-10$, 凹 $f_3=-10$

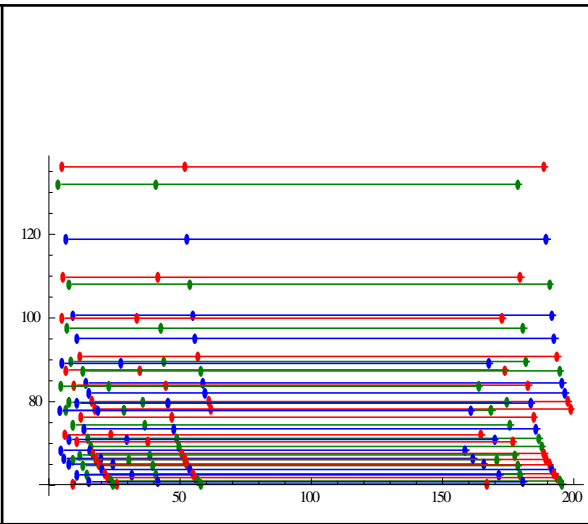


図5.3.3-2 凸 $f_1=150$, 凹 $f_2=-20$, 凹 $f_3=-10$

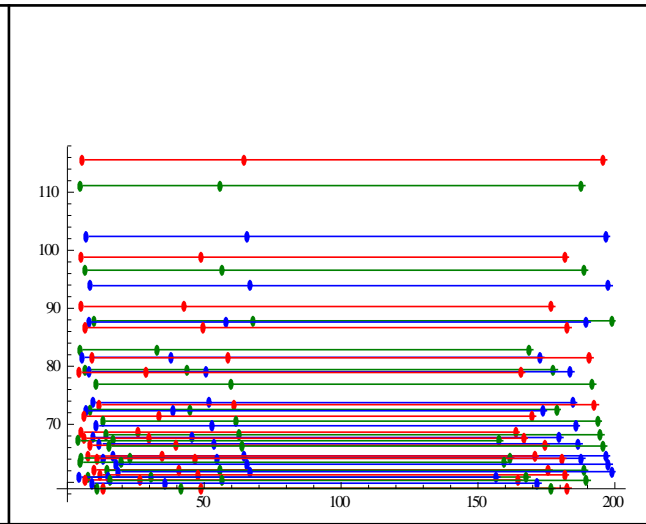


図5.3.3-3 凸 $f_1=150$, 凹 $f_2=-30$, 凹 $f_3=-10$

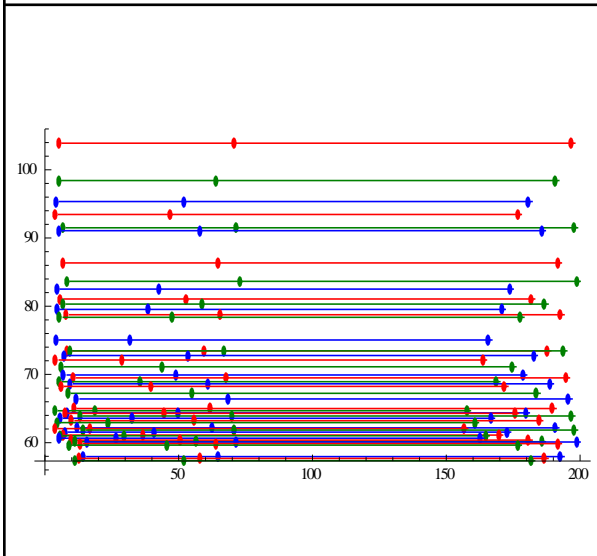


図5.3.3-4 凸 $f_1=150$, 凹 $f_2=-40$, 凹 $f_3=-10$

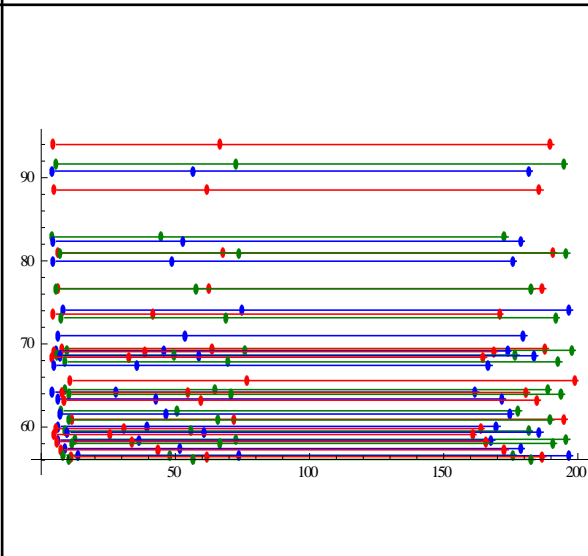


図5.3.3-5 凸 $f_1=150$, 凹 $f_2=-50$, 凹 $f_3=-10$

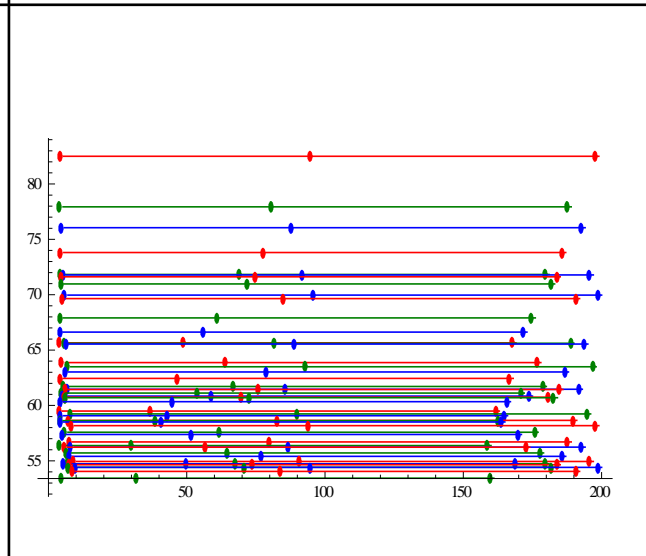


図5.3.3-6 凸 $f_1=150$, 凹 $f_2=-100$, 凹 $f_3=-10$

5.3 3枚組凸・凹・凹レンズの考察

- ① 結果を表5.3.1、表5.3.2、表5.3.3及び図5.3.1-1～5.3.1-6、図5.3.2-1～5.3.2-6、図5.3.3-1～5.3.3-6に示しました。
- ② 前節5.2の凸・凸・凹レンズの組合せと異なり、中間レンズに対物レンズの焦点距離より短い焦点距離を用いると、対物レンズ-フィルム間距離 L_{limit} (可動距離)が短くても、高倍率が得られることが分かりました。
- ③ 中間レンズの焦点距離が短い程、高倍率となり、特に30mm以下の凹レンズを用いると、明確なズーム機能を持つことが分かりました。
- ④ 対物レンズ-フィルム間距離 L_{limit} (可動距離)が150mmでも、図5.3.2-1に示す様に、光学倍率が147倍となることに驚きました。

6. 全体の考察

- ① 数値計算により、対物レンズ-フィルム間距離 L_{limit} (可動距離)が短くても、高倍率の望遠カメラが可能であることを示しました。
- ② 今回の計算はサンプル計算であり、これ以外に多くの組合せで更なる高倍率の望遠カメラが可能であると思います。
- ③ 一点気になっているのは、球面レンズを用いている点です。球面レンズでは良く知られている様に、球面収差により像がゆがむことが有り、折角高倍率の望遠カメラを製作しても、殆ど利用不可という事が考えられます。
- ④ ズーム機能を持った現在の望遠カメラは、非球面レンズを使用して像のゆがみを解消しています。将来、レンズに使用されている非球面函数が分かったら、反映したいと思います。今回は、ズームの基礎知識を理解する目的で、球面レンズを用いて説明しました。少しでもご理解頂ければ幸いです。