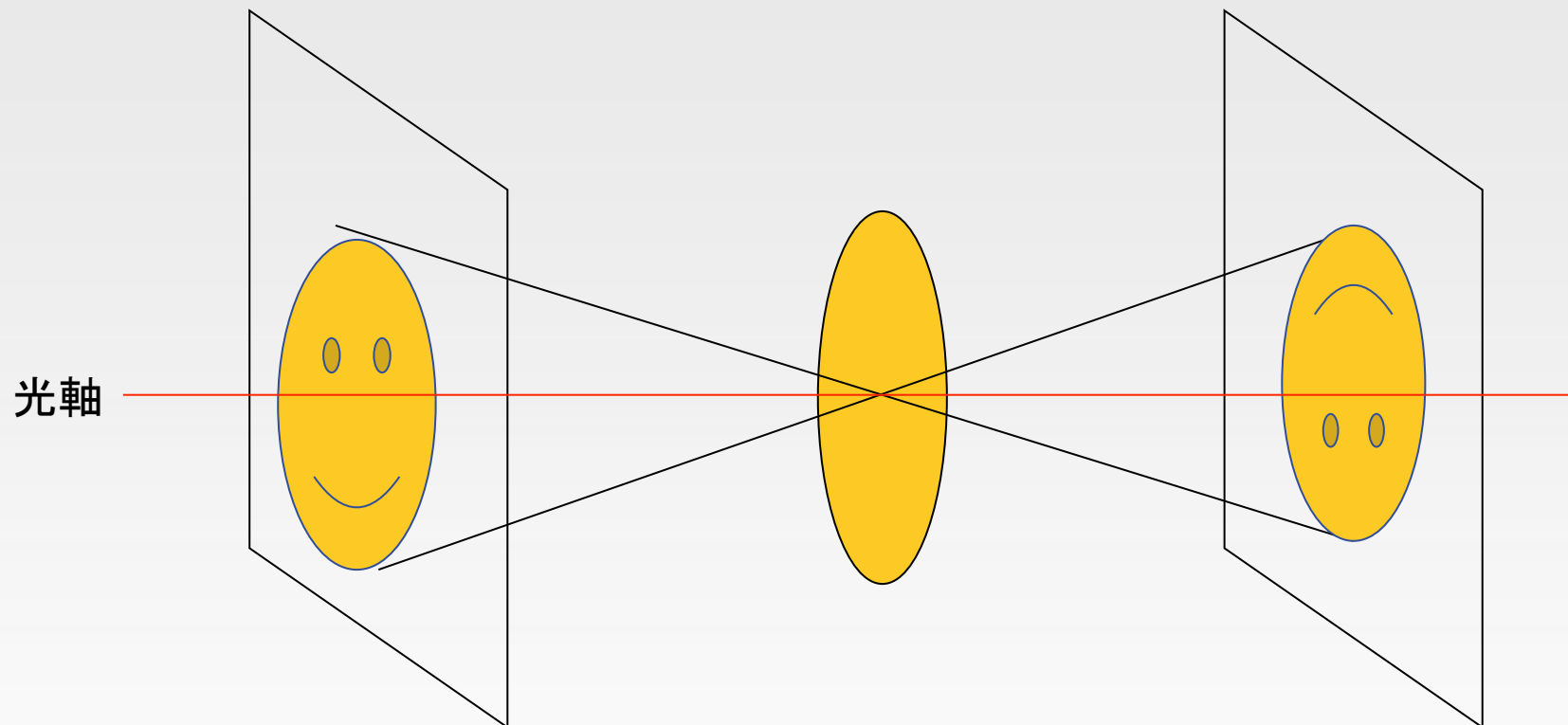




# カメラとレンズの話



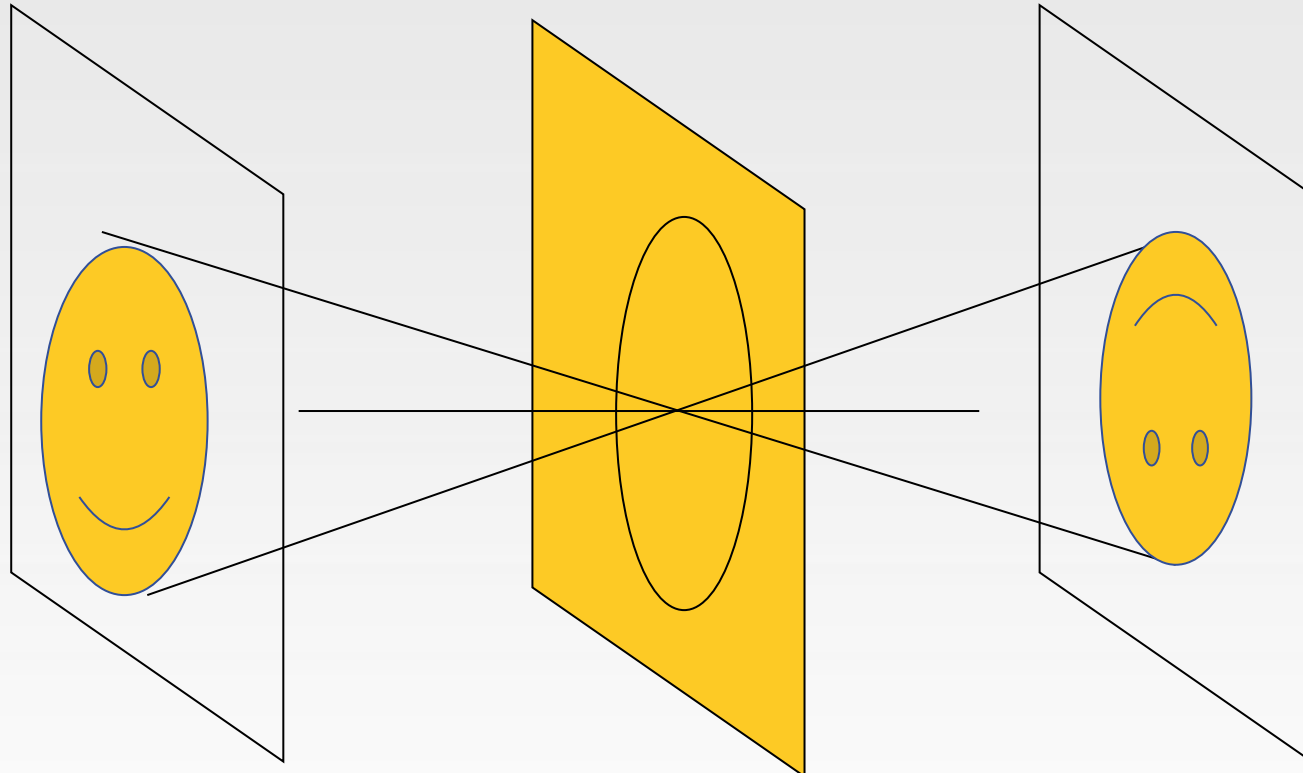
# 理想的な画像センサとは



- 光軸（レンズの対称軸）に垂直な平面上の図形に対して、  
相似の像が得られること
  - ゆがみがあってはいけない
  - ぼけがあってはいけない



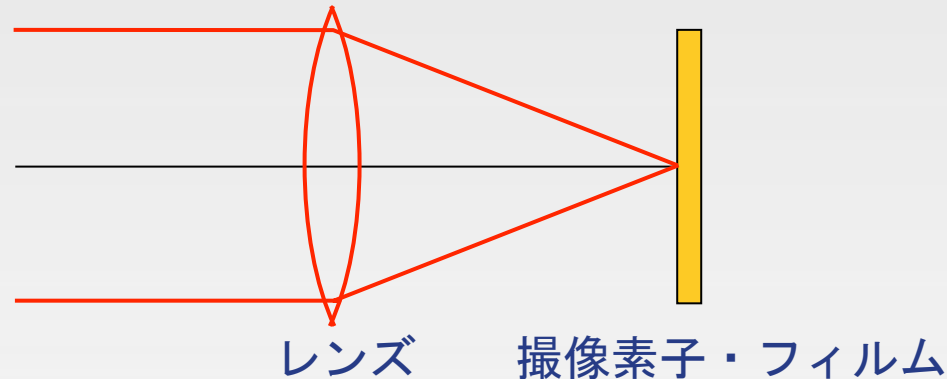
# ピンホールカメラ



- 小さな「針穴」を通して像が出来る
  - 被写体と像の間には、厳密な幾何学的関係が成立している（光の直進性より）
  - 実際には像が暗すぎるので、ほとんど使われない



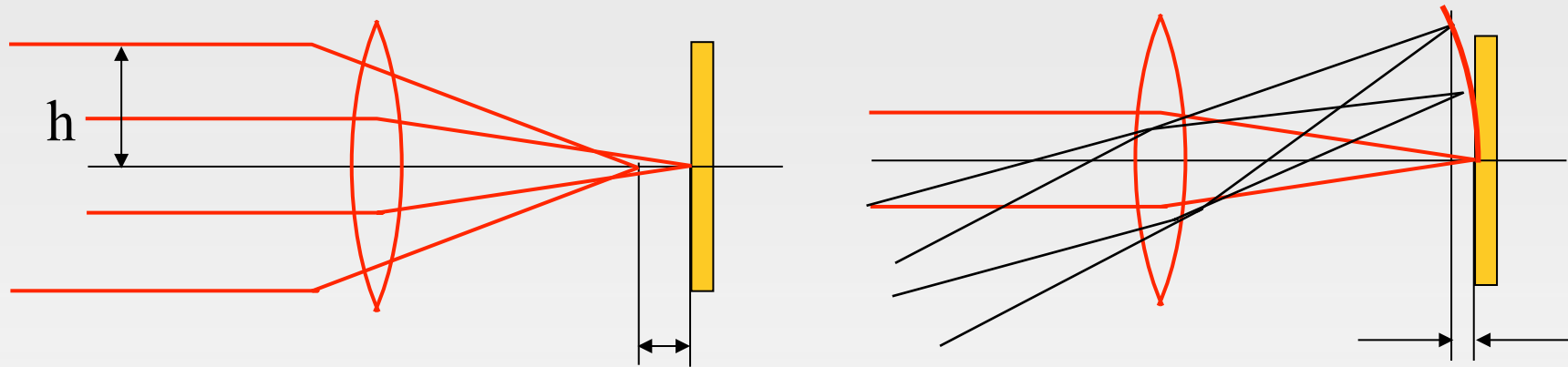
# レンズの役割



- 撮影に十分な量の光を撮像素子に集める
- 画像処理では、ほとんどの場合、カメラの特性は出来るだけピンホールカメラに近いほうが良い
  - 図形が歪まない・像が甘くならない  
→ 単純な1枚のレンズでは実現できない
  - ボケが生じない（光量確保に相反する要求）



# 光学系の機能と理想レンズ

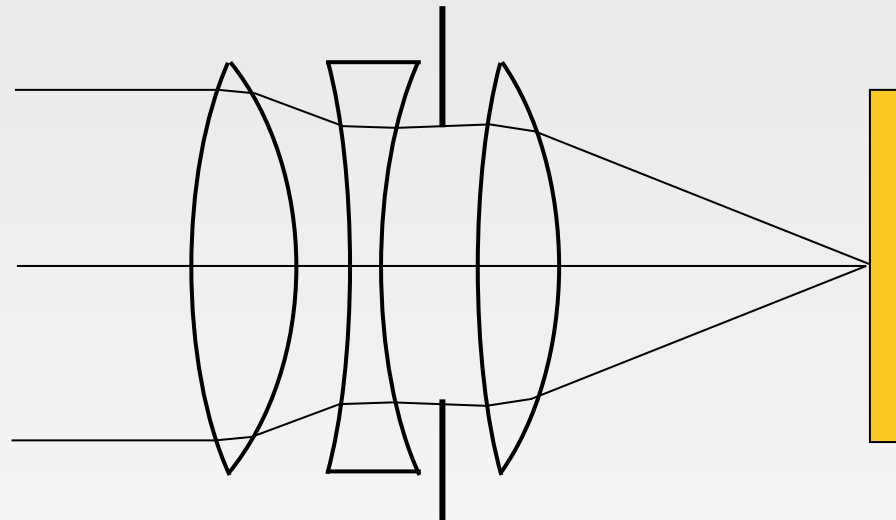


- 光軸に垂直な平面と相似の像が得られること
  - 被写体と像との, **幾何学的な相似**
    - 像が歪んではいけない
    - 像がボケてはいけない
  - **測光学的な相似** (被写体の輝度と画素値との相似)
    - 周辺が中央付近より暗くてはいけない

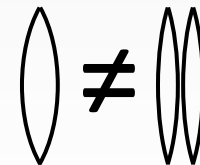
→ 収差論



# 光学系の構成要素

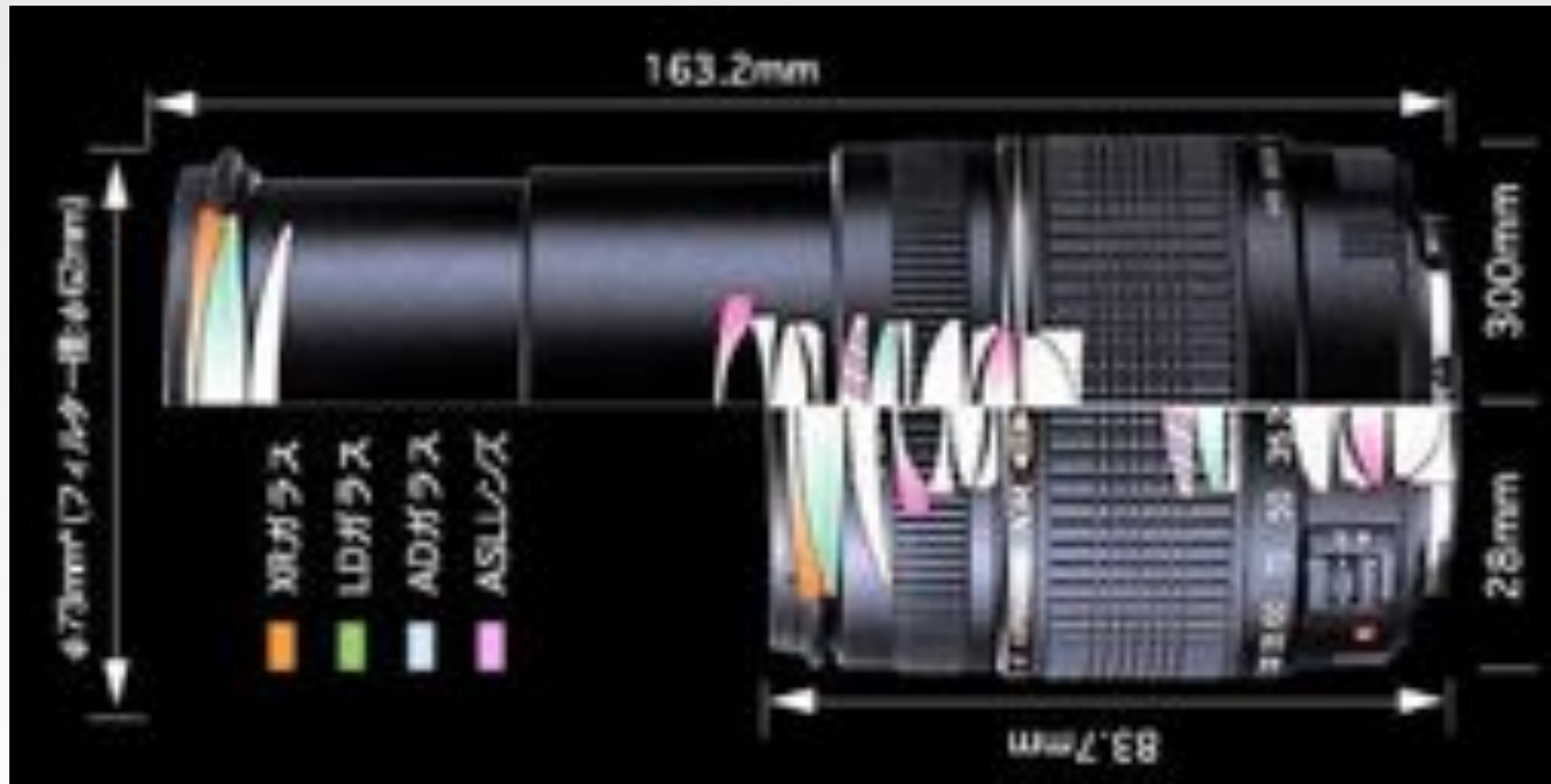


- レンズ系
  - 3～10枚程度　ズームレンズで20枚位まで
  - 収差の低減のためには枚数が必要
- 絞り
  - 光量とボケ量の調節に用いる





# レンズの例

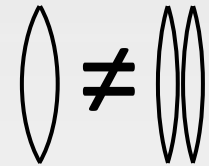


様々な種類，形状のレンズを組み合わせている

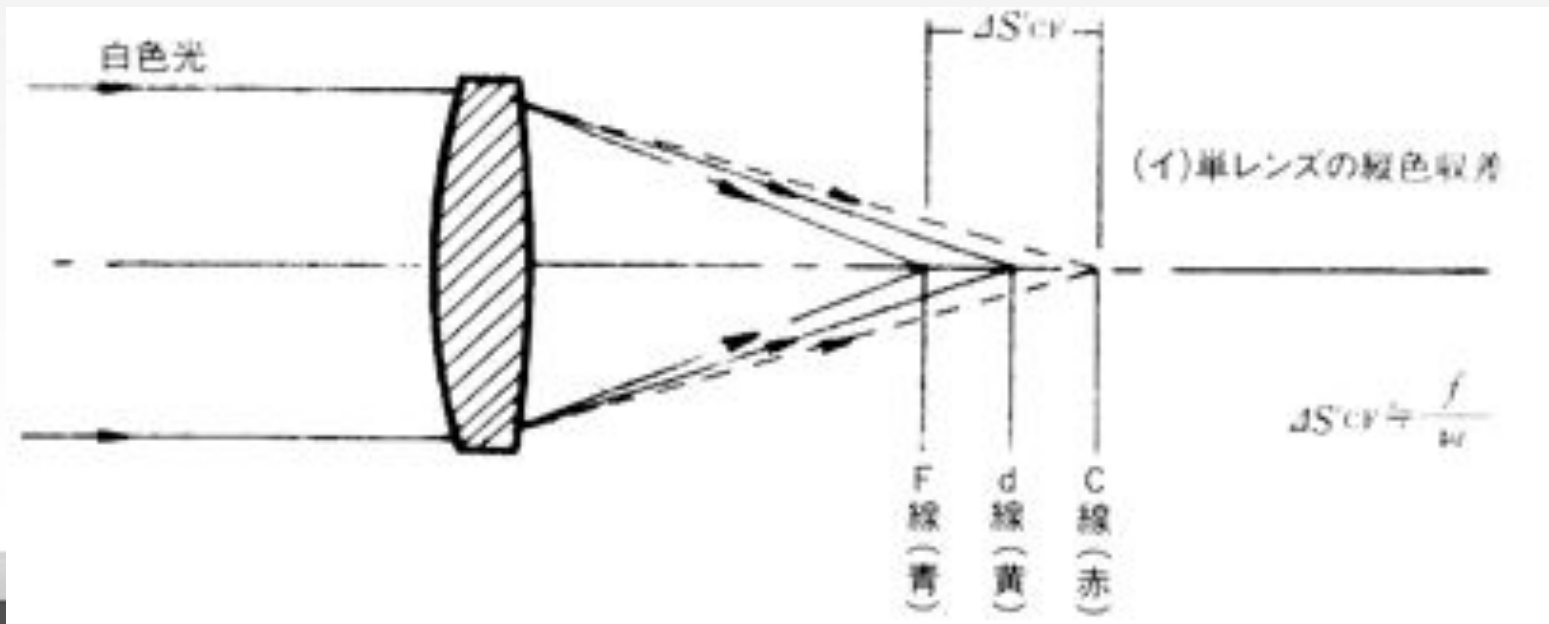
# なぜ多くのレンズ、ガラスを 組み合わせるのか

- 単色収差補正のため

- 屈折率が高くて薄いガラスと、  
屈折率が低くて厚いガラスは収差特性が異なる



- 色収差補正のため



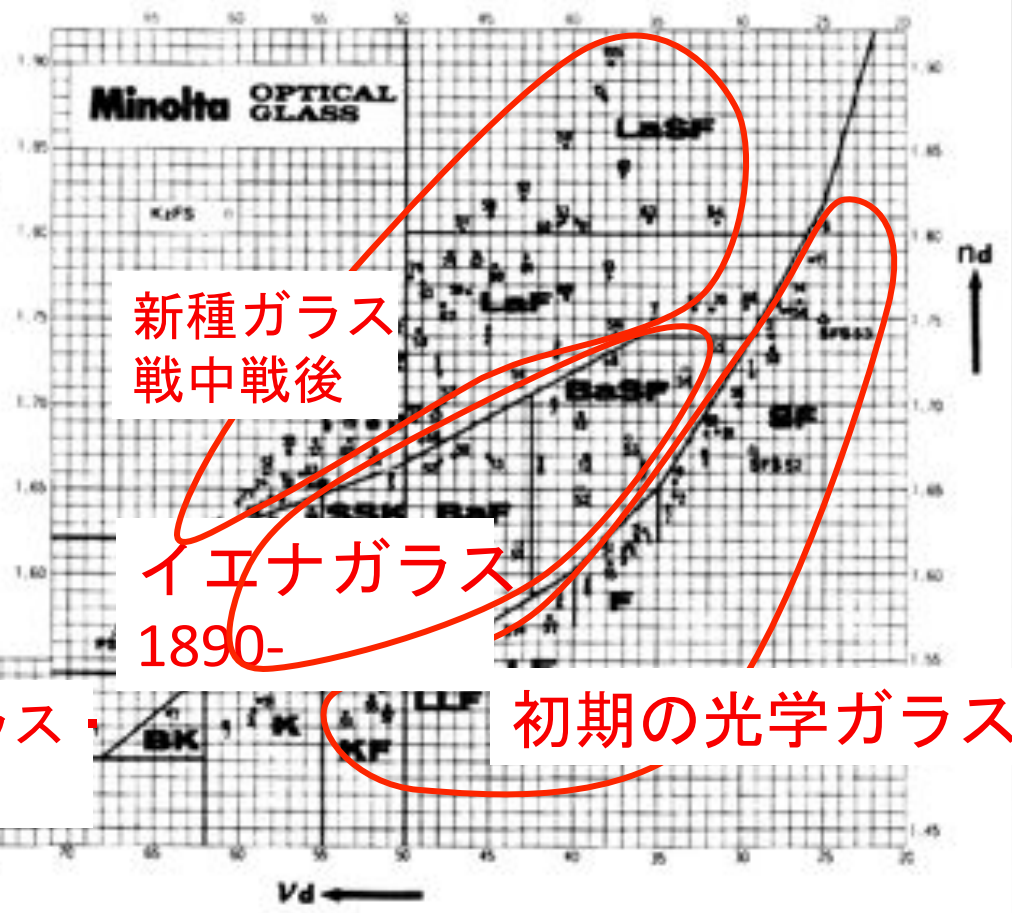
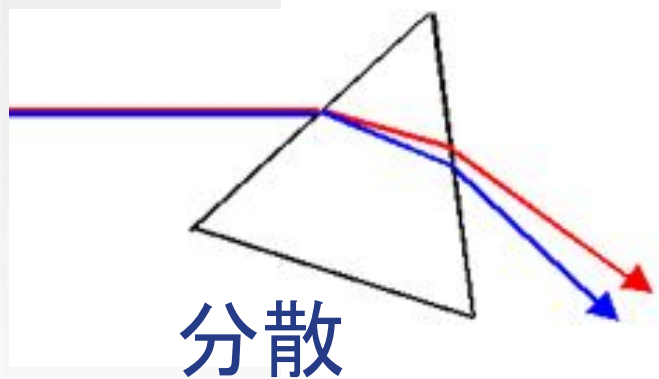




# 光学ガラスの定数



図2・6 光学ガラスチャート



異常分散ガラス・  
蛍石 1970-

新種ガラス  
戦中戦後

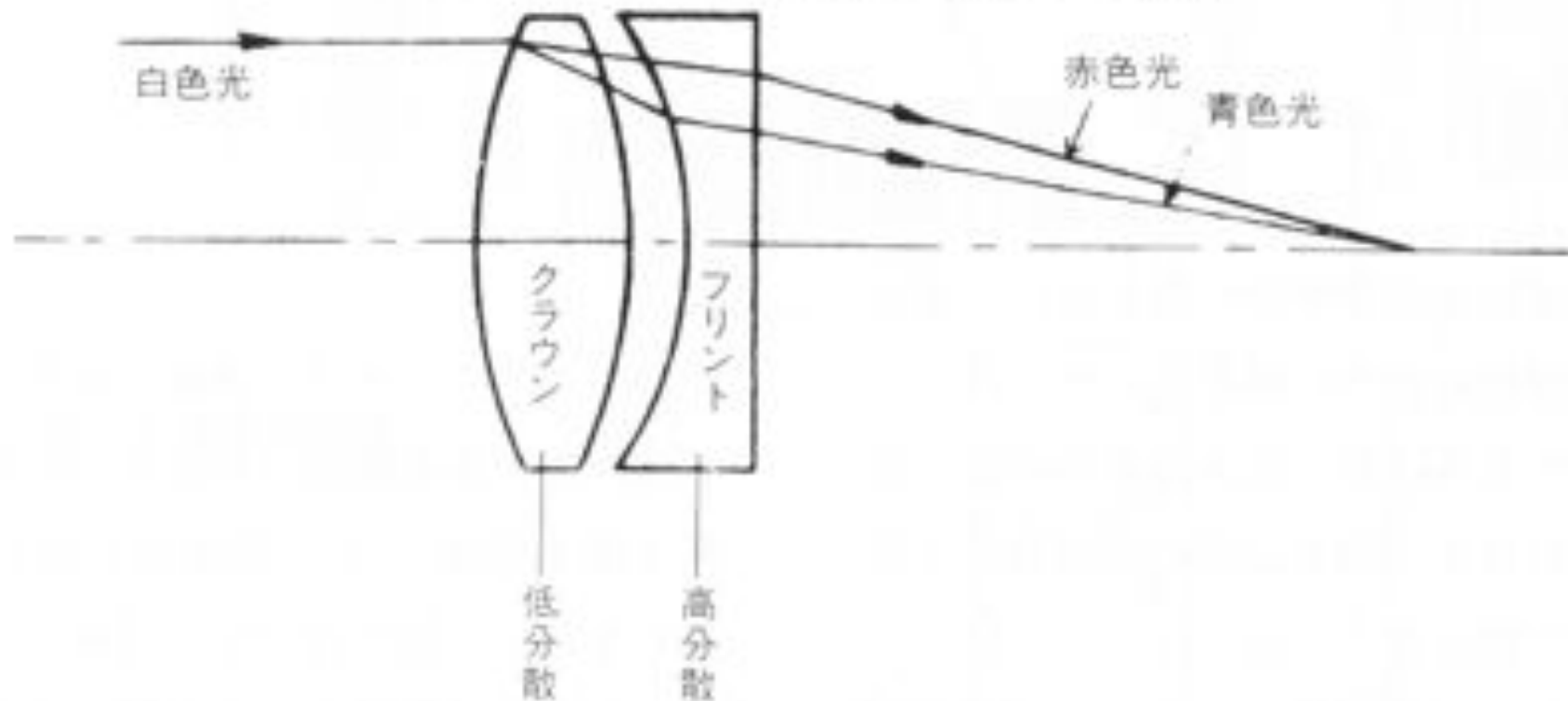
イエナガラス  
1890-

初期の光学ガラス

- 基本的には2つの定数（屈折率・分散）で表す

# 色消しレンズ

図3・3 毒をもって毒を制す色消しの原理



- 分散の違う2種類のガラスで色収差を相殺
- ただし非線形成分は相殺できない



# 光学ガラスの製造方法(1)



①粘土ルツボの製作

- 粘土るつぼ法 — 最も伝統的で高性能な製法



## 光学ガラスの製造方法(2)



②粘土ルツボごと取り出された熔融ガラス

- ガラスへの色づきを避けるため、きわめて純度の高い原料が用いられる

- 精密に調合し混合した原料（粉末）を炉で溶かす



# 光学ガラスの製造方法(3)



③ルツボから取り出されたガラス

- ルツボを割ってガラスを取り出す
  - ガラスも同時に割れるが，不均一部分（脈理，泡）が除きやすい．良品率 50% 程度

- 徐冷・アニール
  - 2週間以上かけてゆっくり冷やす
  - 整形後再加熱して長期間保持（ガラスの均一性を上げ，ひずみを取り除く）



## 光学ガラスの製造(4)



④白金ルツボによる溶融

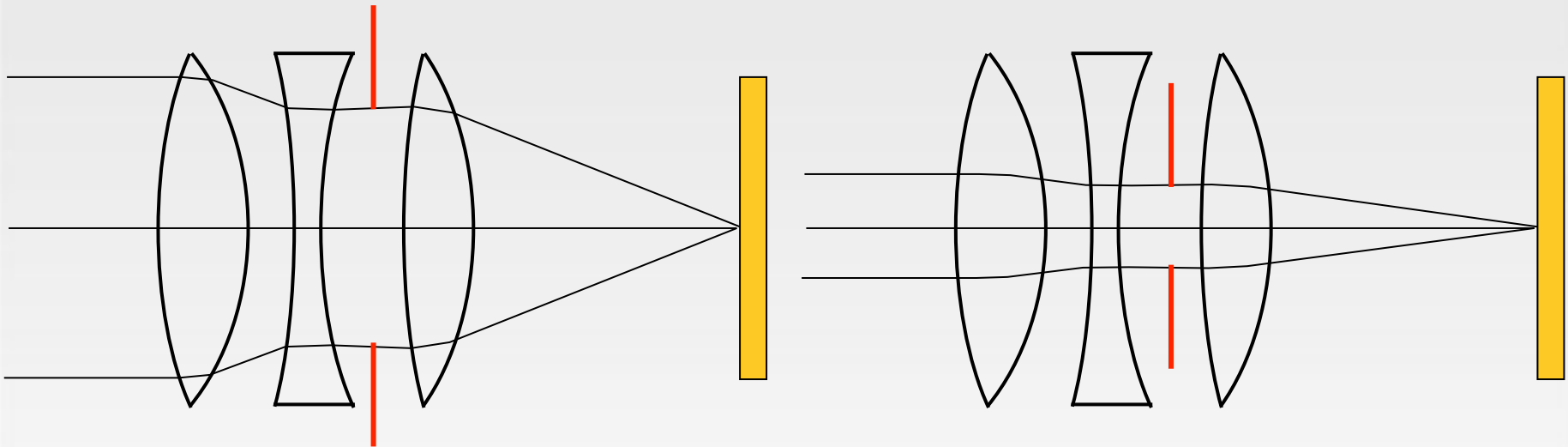
### ○ ガラスの特性

- 屈折率 $\pm 0.00050$
- 分散 $\pm 0.8\%$  程度
- 特殊な性質を持つものは 1g あたり数千円のものも

- 腐食性のある材料は白金ルツボで溶融



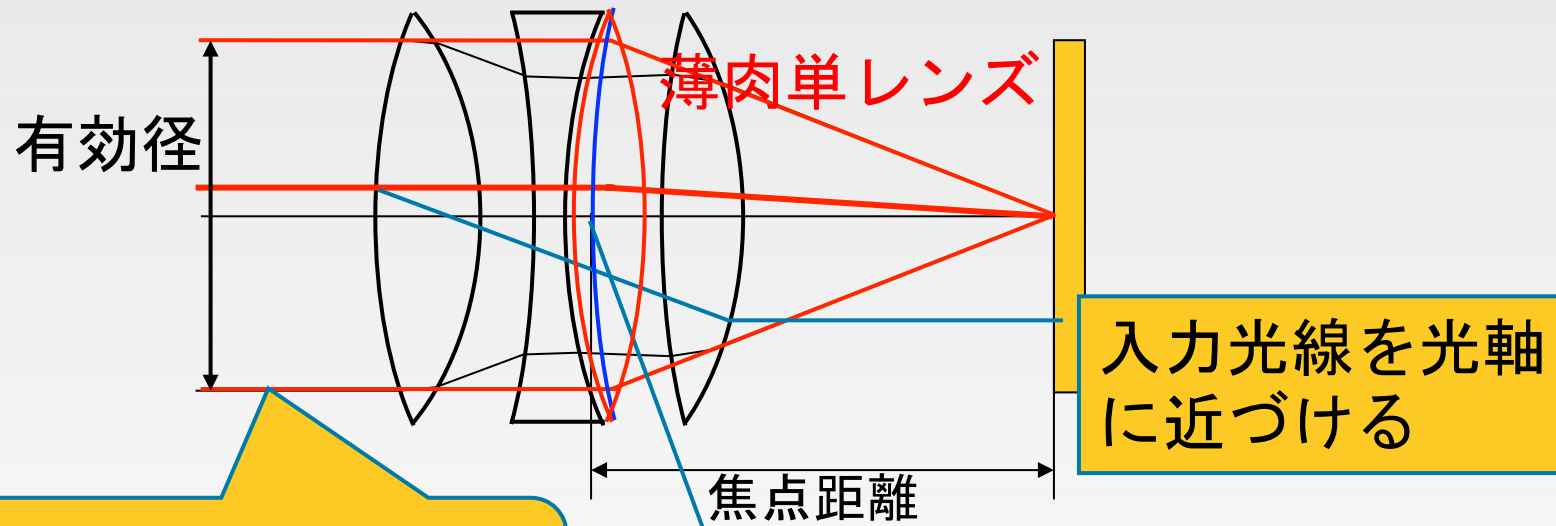
# 焦点距離



- これら2つの光学系の焦点距離は同じもの？
    - 絞りの設定によって変化しない, 焦点距離の定義が必要である.
  - 収差があると焦点距離は変わるの？
    - 収差の大きさによって変化しない, 焦点距離の定義が必要である.
- 絞りを極限まで絞り込んだ状態で焦点距離を定義する



# 焦点距離の定義



入力光線と出力光線を延長して交点を求める

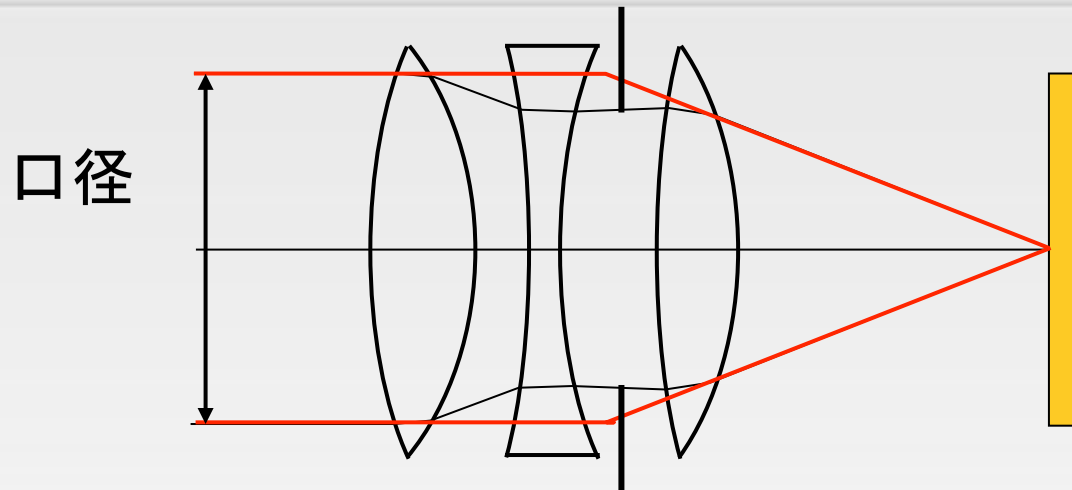
交点の曲面を求める

- 焦点距離は、近軸領域で定義する
  - 近軸領域：光線が光軸に非常に近い and 向きが光軸にほぼ並行





# 口径とF値



- 口径は、絞りの実際の直径ではなく、入射光束の直径である
- $F \text{ 値} = \text{焦点距離} / \text{口径}$ 
  - F値が小さいほど明るいレンズである
  - F値が2倍 = 明るさが  $1 / 4$
  - 1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22, 32, 45, 64, ...

# 絞りとシャッター速度の例



絞り

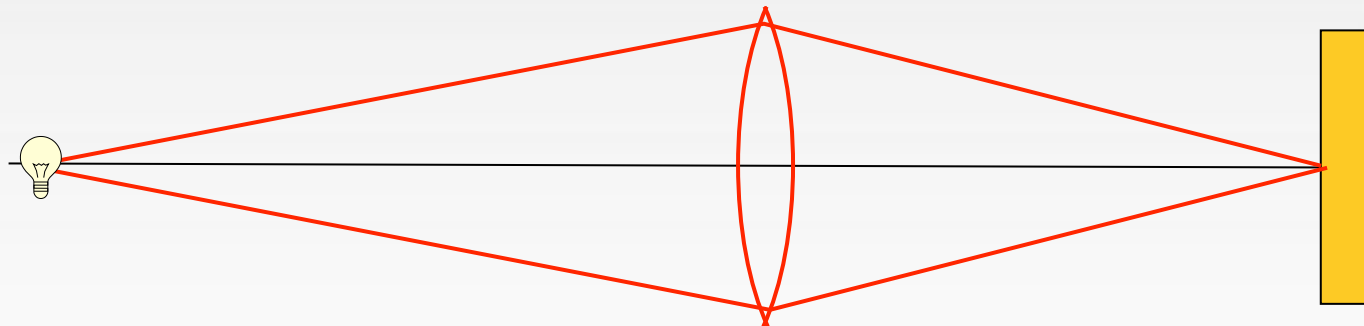
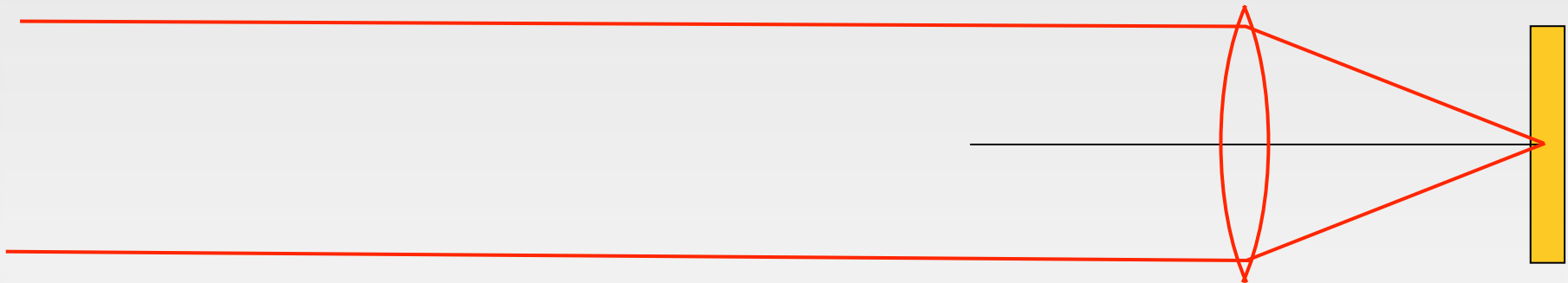
フォーカス

シャッター速度

- 昔のカメラのうち一部は、露出計を簡略化するために絞りとシャッター速度を同軸に並べていた

# ピントが合うとは

無限遠にピントが合った状態

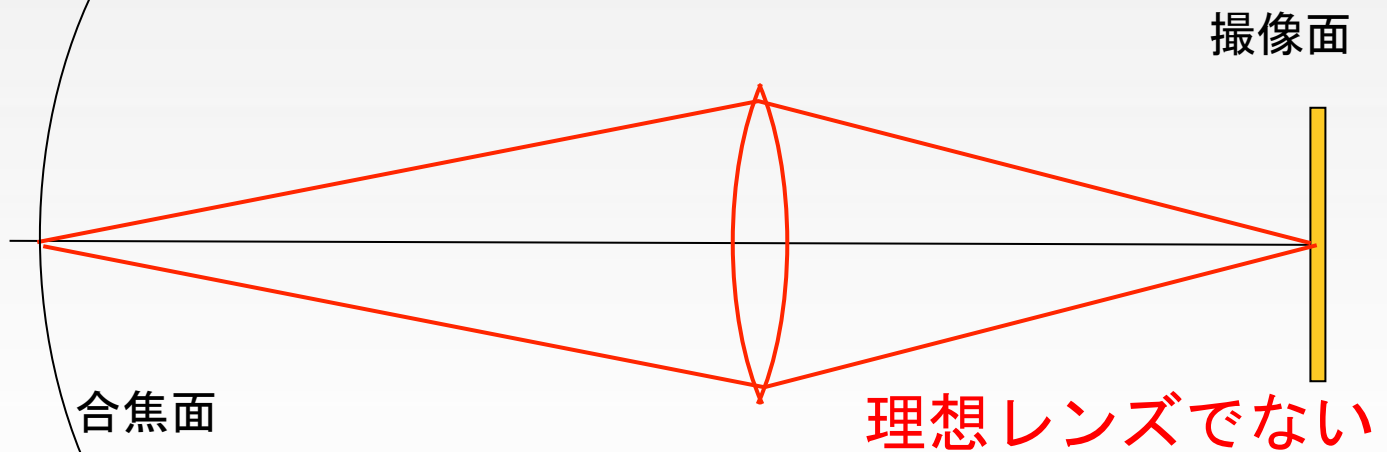
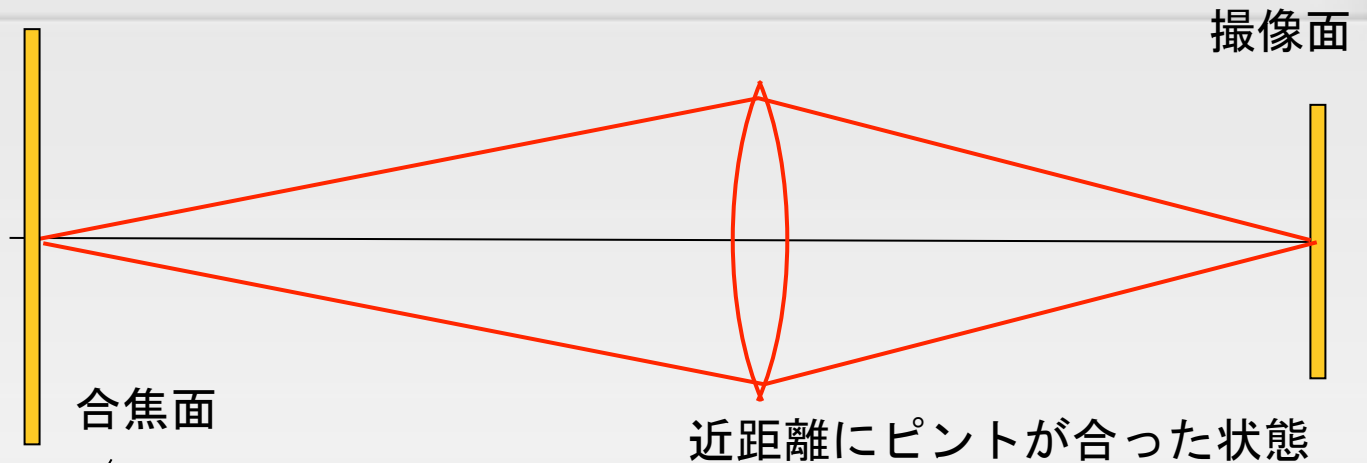


近距離にピントが合った状態

- 1点から出た光が撮像面上で再び1点となる



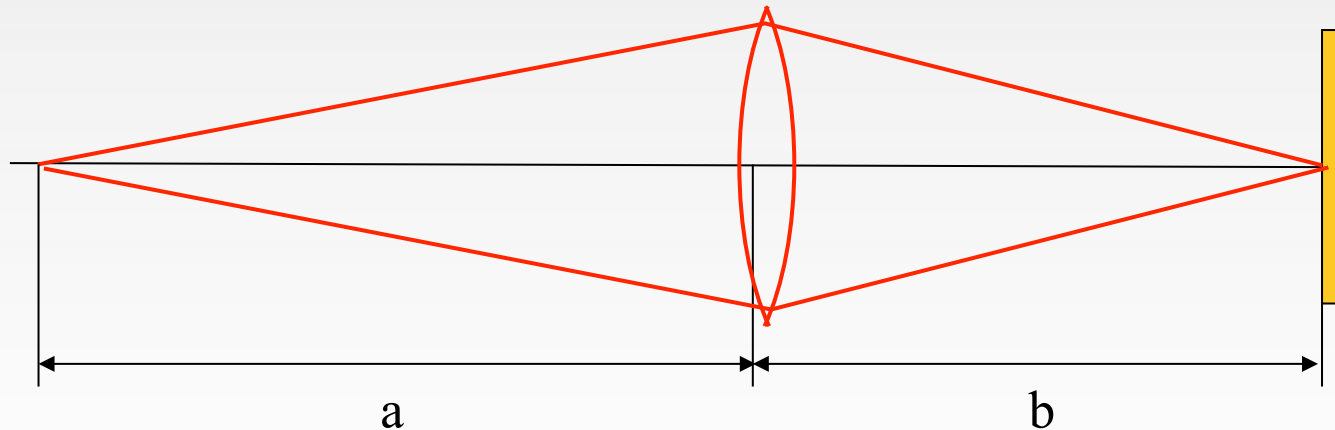
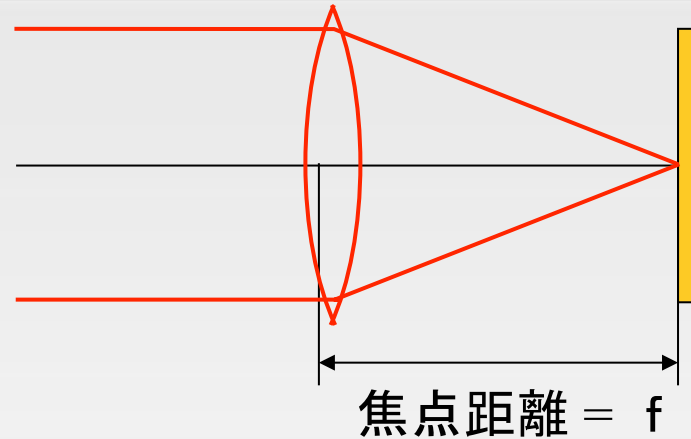
# ピントの合う面



- 撮像面が平面なら合焦面も平面（理想レンズの場合）

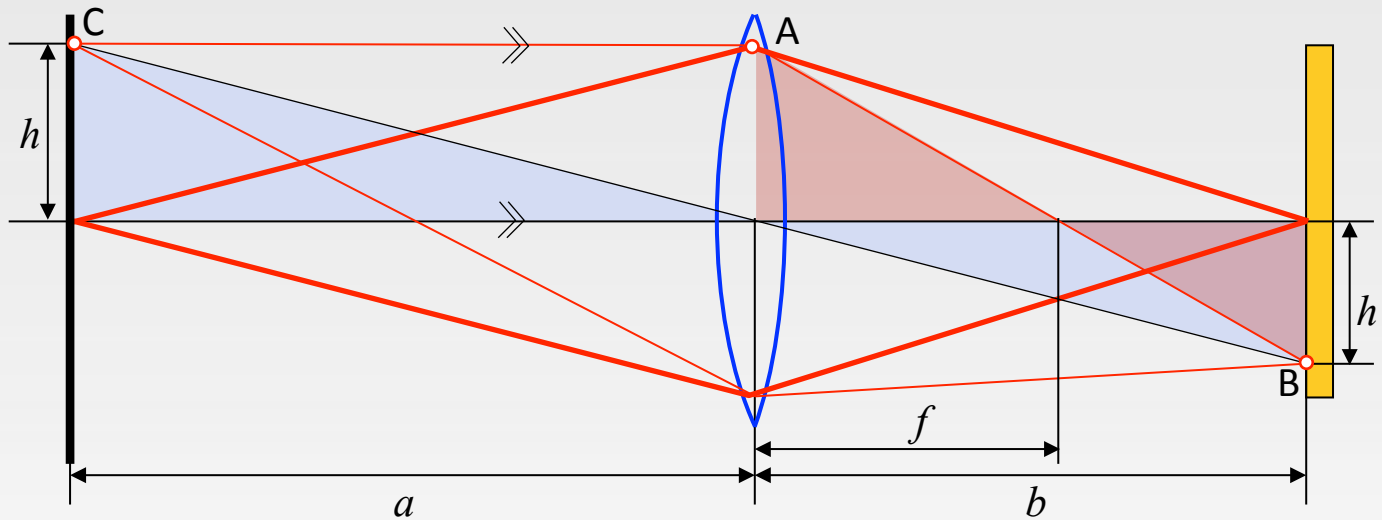
# 結像公式(1)

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$$



- レンズに近接した物体ほど，像は像面の後ろ方向に出来る
- レンズを撮像面から離すことで近くにピントを合わせる

# 結像公式は証明できる



$\frac{h}{a} = \frac{h'}{b}$  から  $h = \frac{a}{b}h'$  を得る. これを  $\frac{h}{f} = \frac{h'}{b-f}$  に代入して

$h$  を消去すると,  $\frac{ah'}{fb} = \frac{h'}{b-f}$  となって自然に  $h'$  も消える.

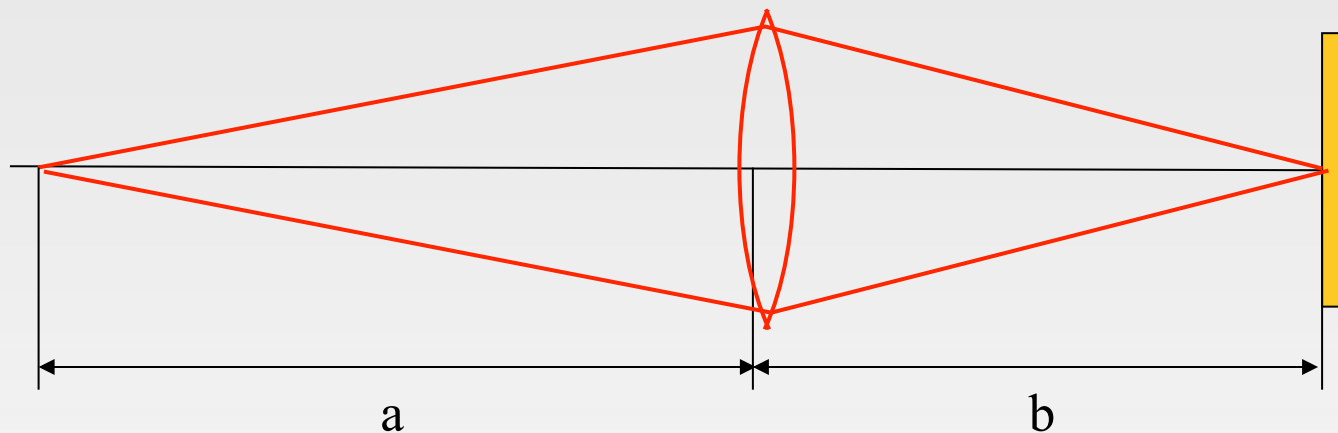
$\frac{a}{fb} = \frac{1}{b-f}$  これを整理すると  $\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$  が得られる.



# 結像公式から分かること



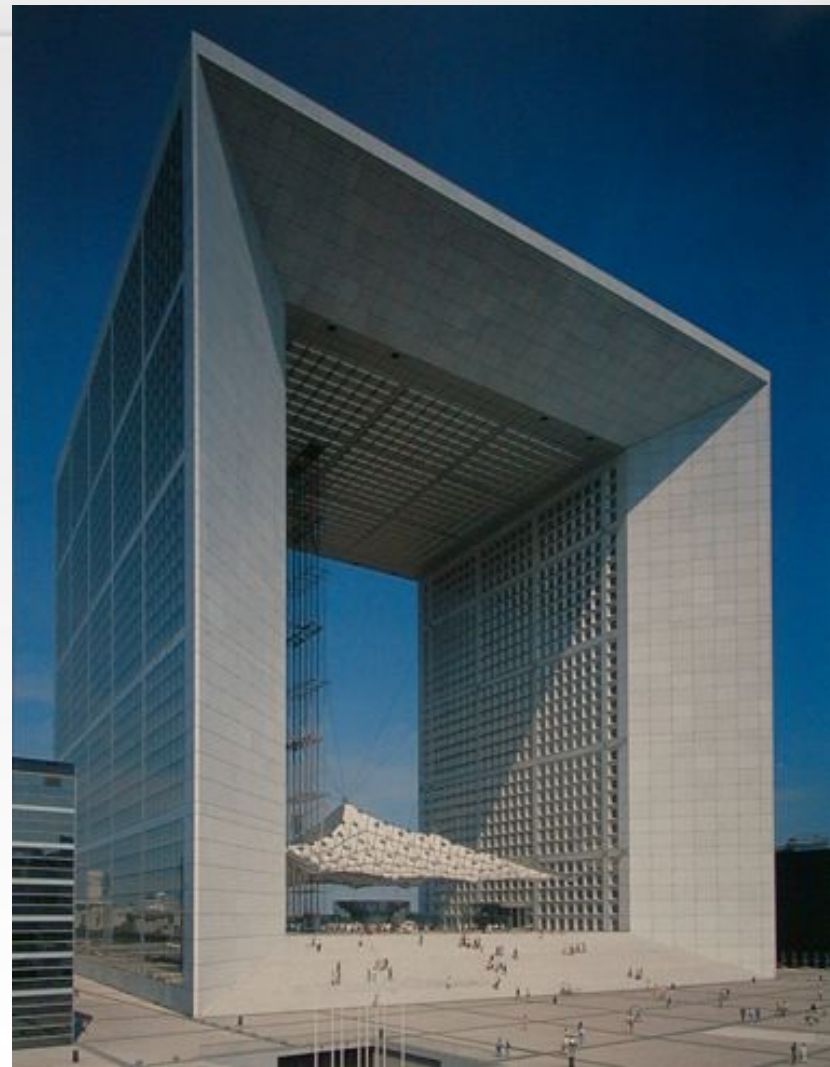
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$$



- $b = f$  なら  $a = \infty$ 
  - 無限遠にピントが合っている状態を表す
- $a = f$  なら  $b = \infty$ 
  - レンズは逆向きに使っても同じ焦点距離



# アオリ撮影の応用例（1）



- 建築写真において多用される





## アオリ撮影の応用例（2）



- 商品撮影でも多用（登場感など）



# アオリ撮影の応用例（3）



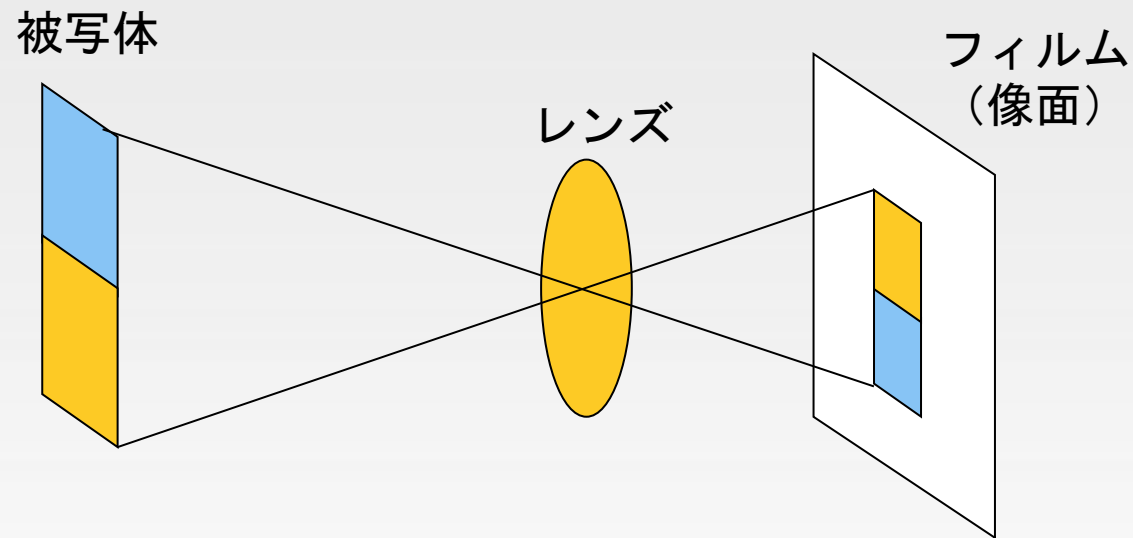
補正前



補正後



# アオリ（シフト）撮影の原理（1）



- 通常撮影  
被写体とフィルム面が平行である場合、被写体と相似な図形が撮影される



## アオリ（シフト）撮影の原理（2）



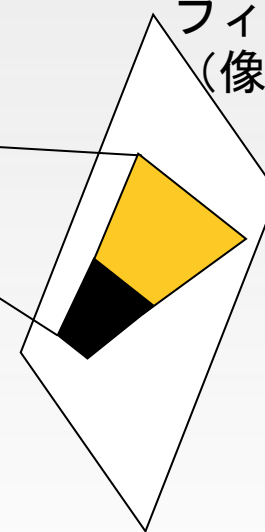
被写体



レンズ



フィルム  
(像面)



- 通常撮影  
被写体とフィルム面が平行でない場合，カメラに近い部分が拡大される



# アオリ（シフト）撮影の原理（3）



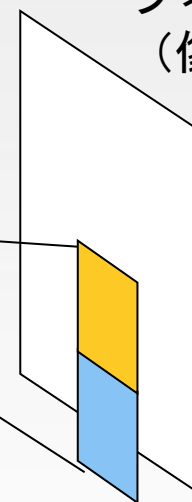
被写体



レンズ



フィルム  
(像面)



- アオリ撮影  
フィルム面と被写体の平行を保ったまま、フィルム面を面内平行移動する



# 撮影機材：ビューカメラ



◆アルカスイスMライン4×5



● 778,000円



# 35mm 一眼レフ用シフトレンズ



TS-E24mm F3.5L



TS-E45mm F2.8



TS-E90mm F2.8



キヤノン



PC Nikkor 28mm F3.5

希望小売価格(税別) ¥136,000



ニコン



# 画像処理でも修正できる







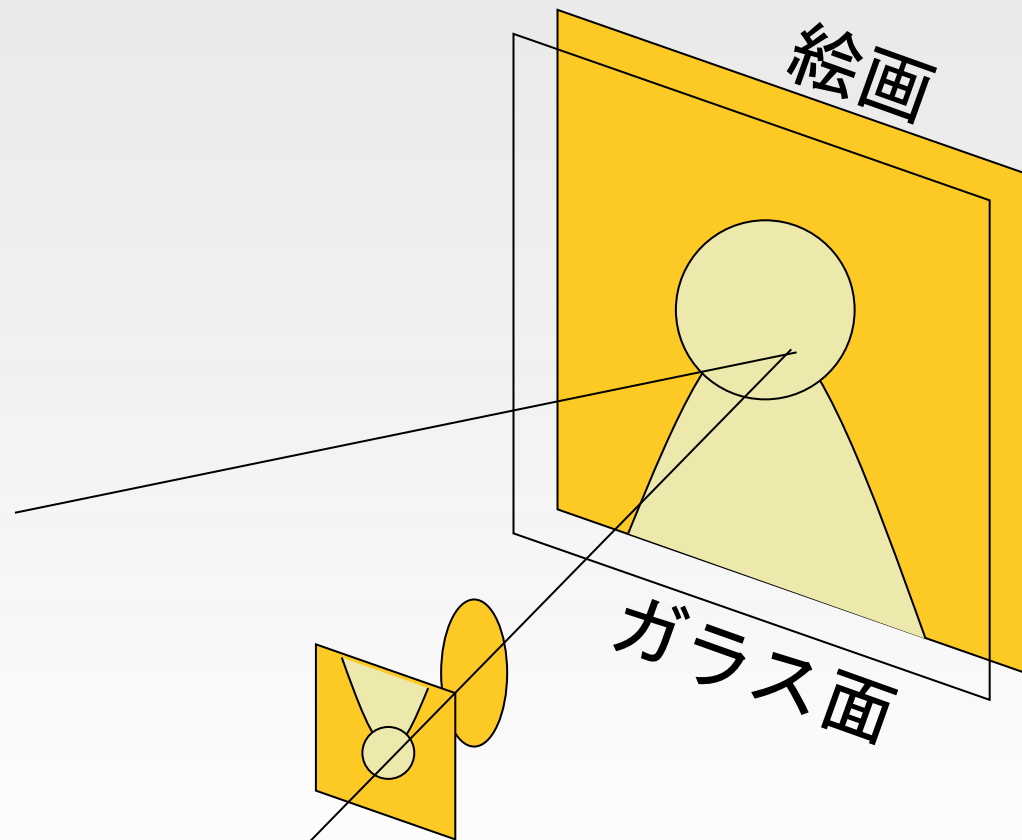
# 修正後



2-D homography 変形



# アオリ撮影の応用例（４）



- ガラス面等の反射を抑えたい場合



# イメージサークル



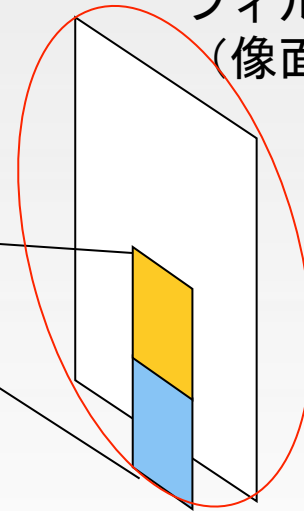
被写体



レンズ



フィルム  
(像面)



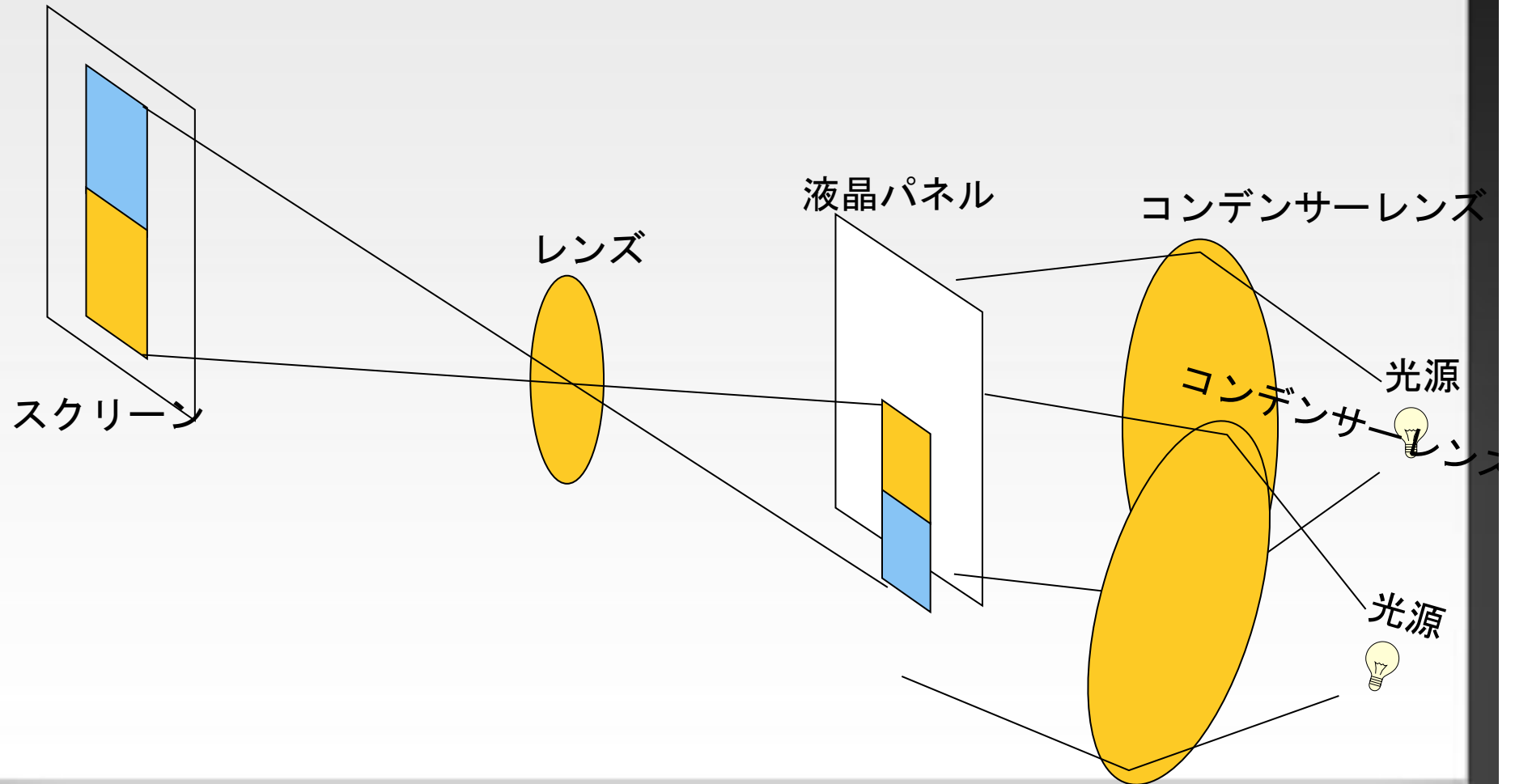
- レンズが画像を形成できる直径には限界がある



# シフトの実例



- 液晶プロジェクタ

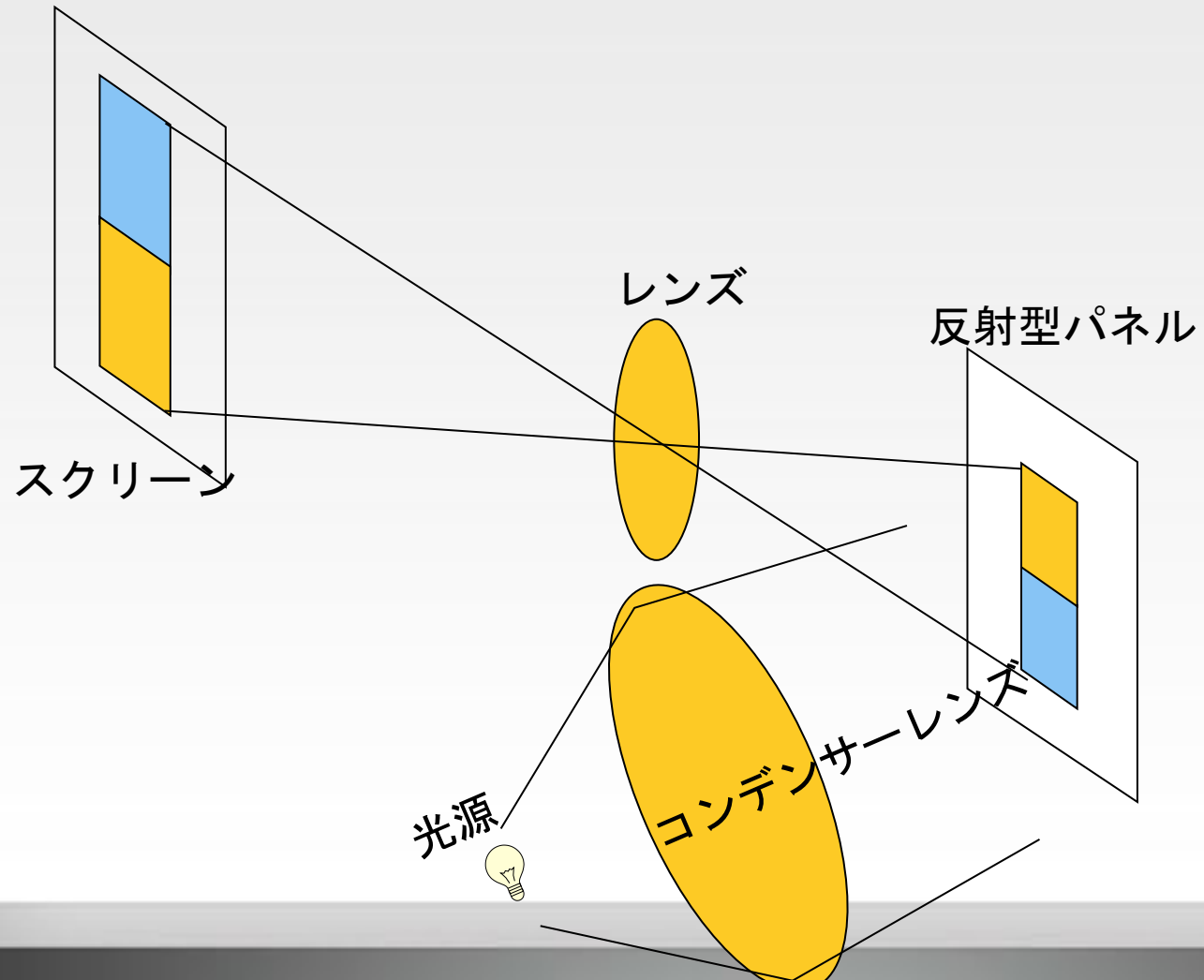




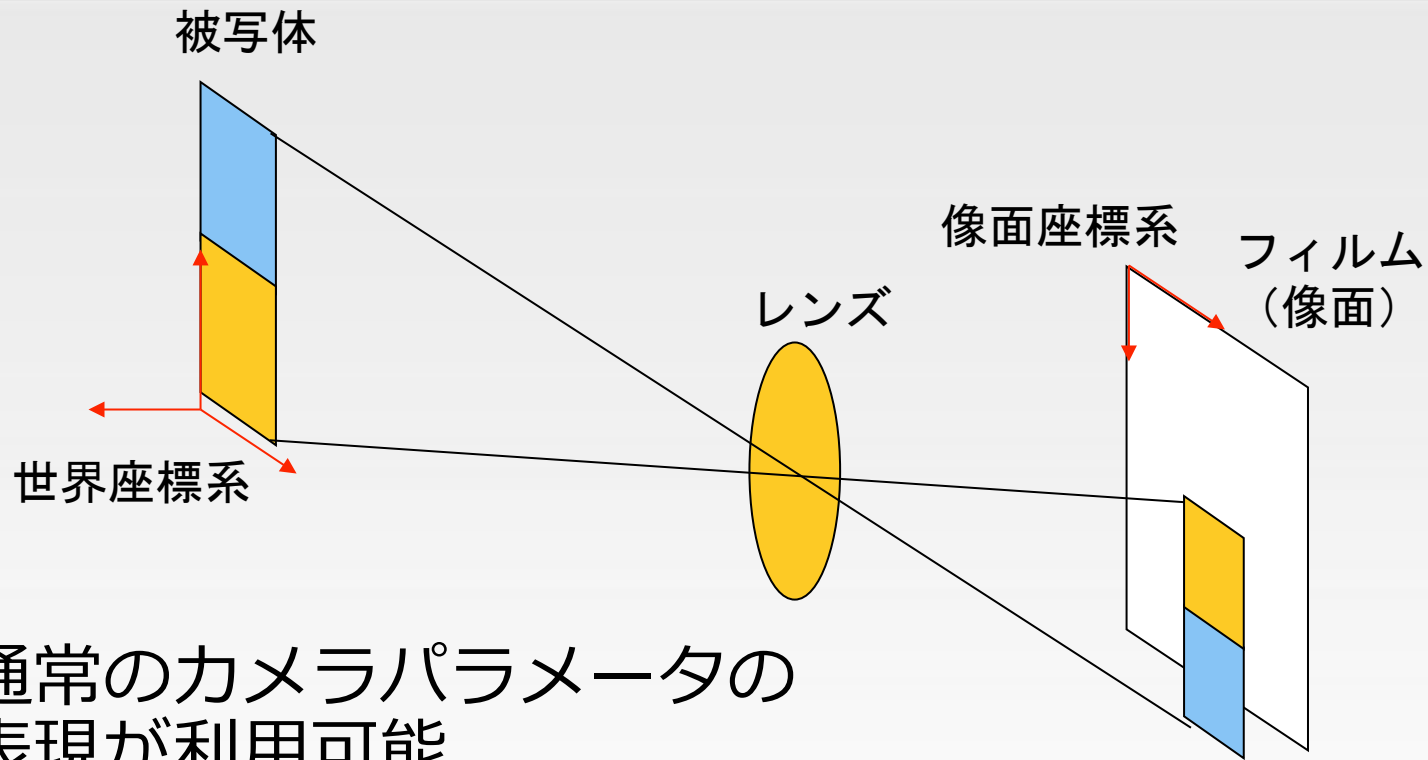
# シフトの実例



- 反射パネル方式プロジェクタ



# シフト光学系の キャリブレーション

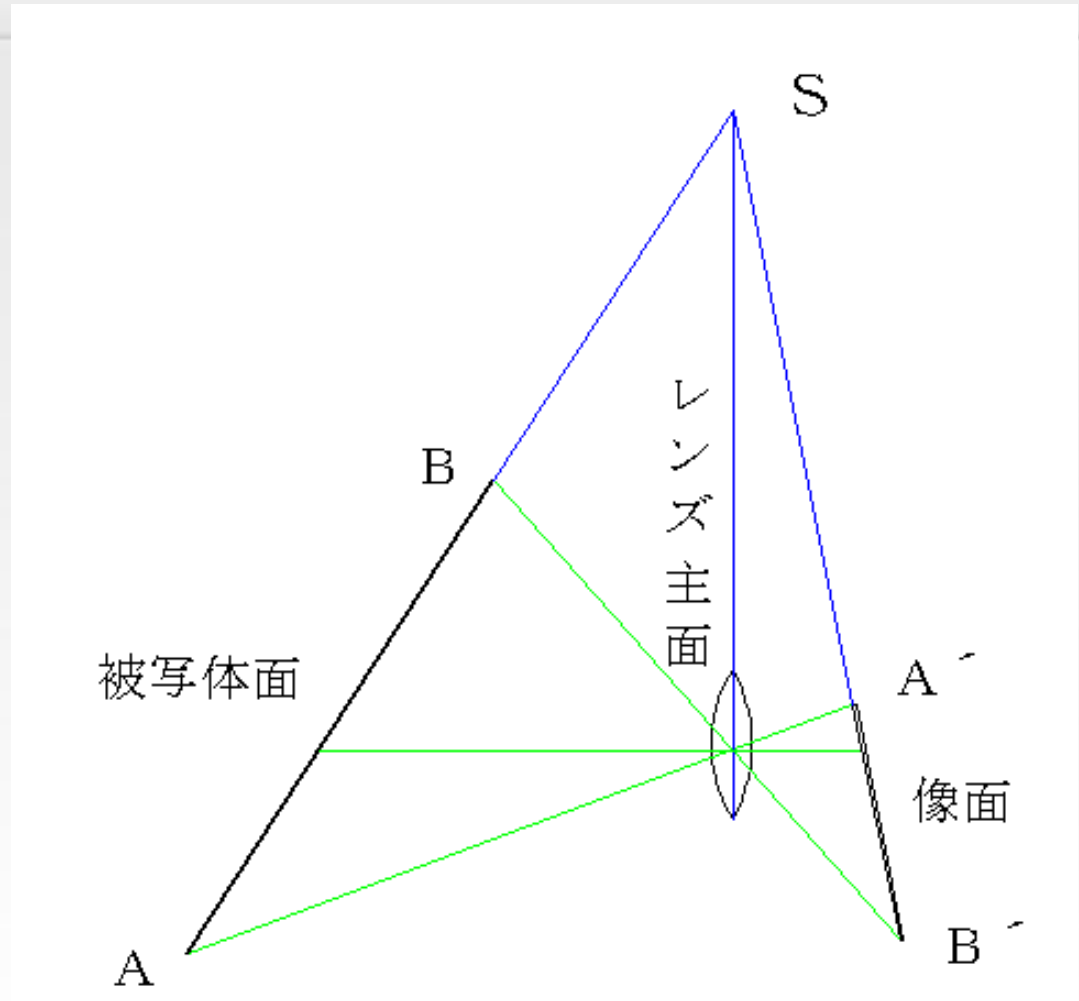


- 通常のカメラパラメータの表現が利用可能
- 像面座標系上での平行移動が加わるだけ

$$h \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & s \cdot f \\ 0 & a \cdot f \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & X_t \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & Y_t \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & Z_t \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$



# チルト（スイング）撮影



- シャインフリューク(Scheimpflug)の法則  
通常撮影は、点Sが無限遠点

## ティルト撮影の例（1）



- 船の模型全体にピントが合っている





# わざとぼかす



- 本城直季, "small planet" など. ミニチュア効果として最近流行



# 撮影機材：ビューカメラ



◆アルカスイスMライン4×5





# 35mm 一眼レフ用シフトレンズ



TS-E24mm F3.5L



TS-E45mm F2.8



TS-E90mm F2.8



キヤノン



ニコン



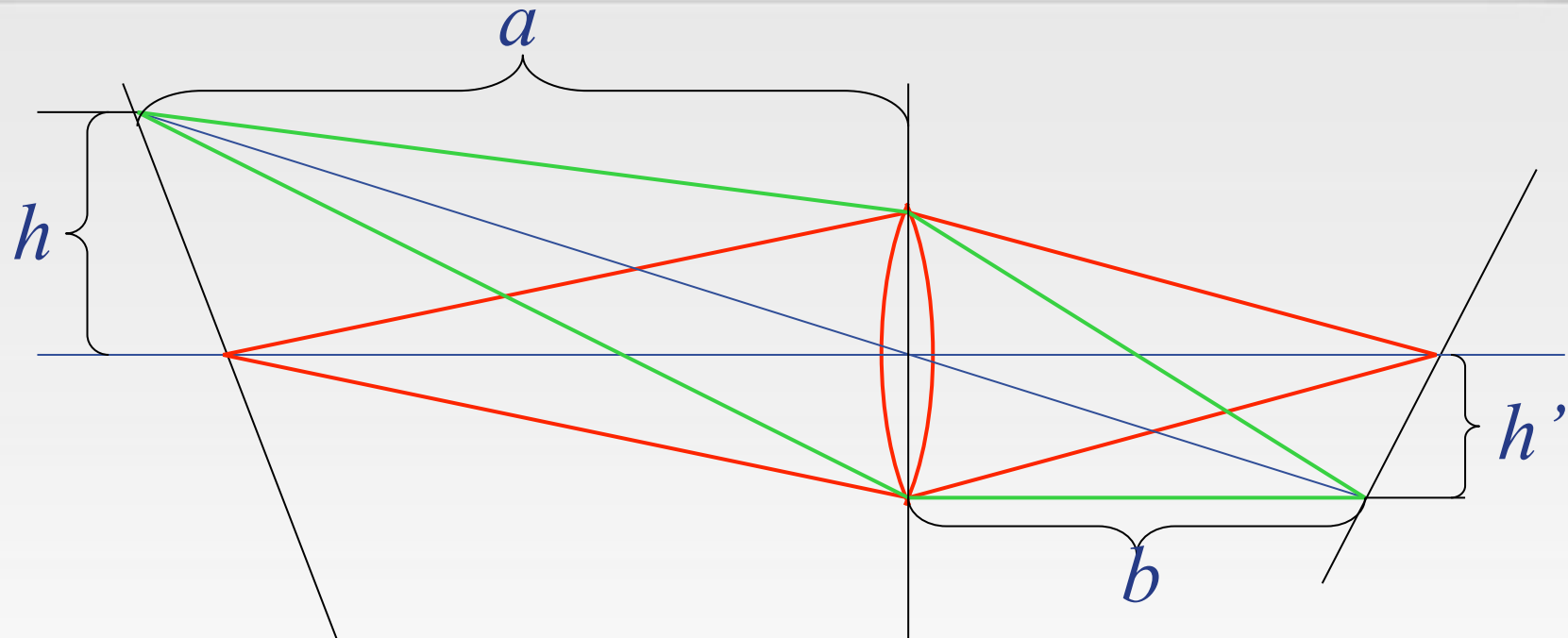
# 攝影機材：內藏型



- Rolleiflex SL66E



# シャインフリュークの法則の証明



- 上図のように値をとる (全て正の数とする)

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

結像公式

$$\frac{h}{a} = \frac{h'}{b}$$

倍率の公式

$$a = \alpha h + a_0$$

平坦面



# シャインフリュークの法則



$$b = \frac{f\alpha}{f - a_0} h' - \frac{fa_0}{f - a_0}$$

は,  $\alpha, f, a_0$  が定数なので,  
直線の方程式である.

またこの式について,  $b=0$  なら (被写体とレンズ面の交わり)

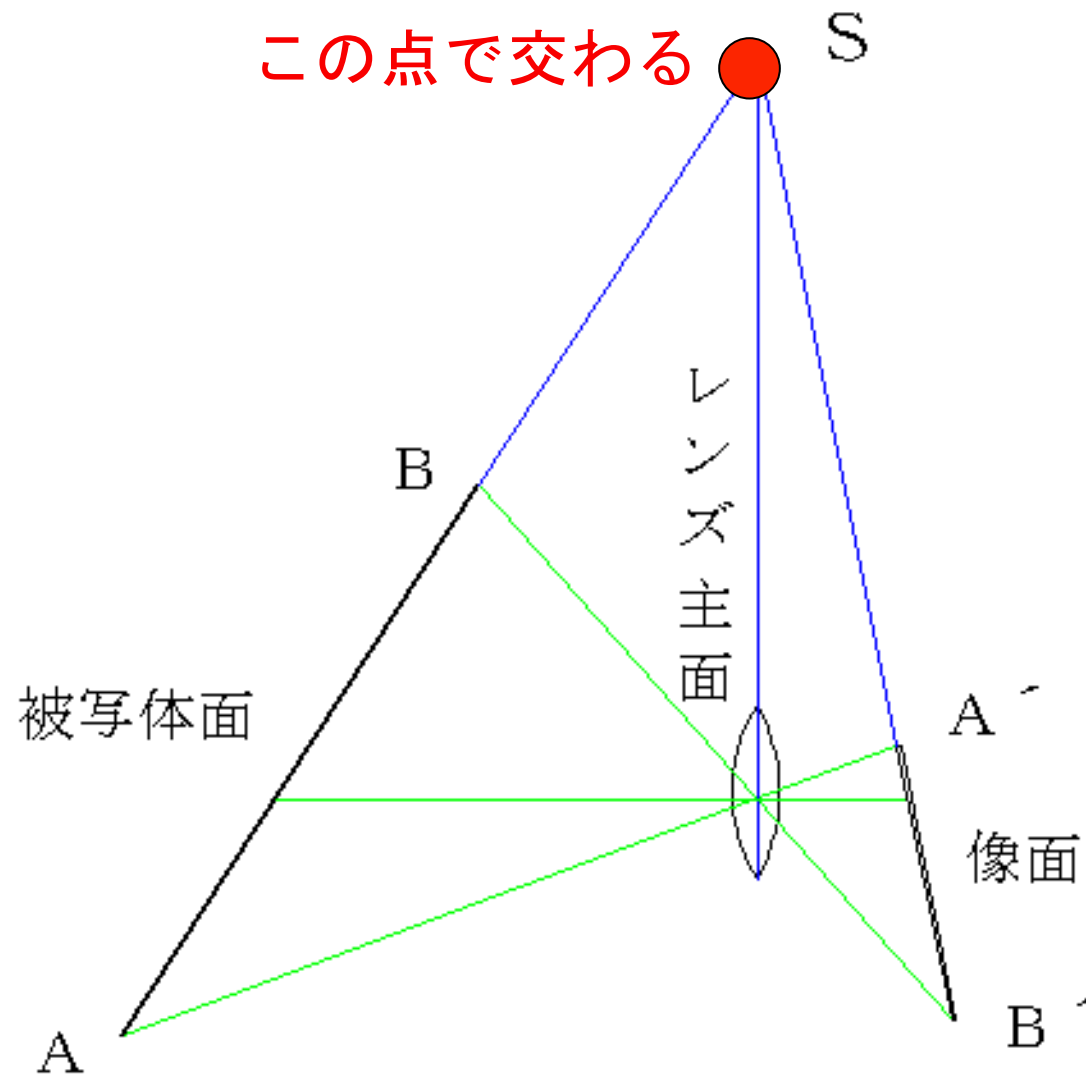
$$h' = \frac{a_0}{\alpha}$$

一方, 像の式  $a = \alpha h + a_0$  で  $a=0$  なら (像とレンズ面の交わり)

$$h = -\frac{a_0}{\alpha}$$

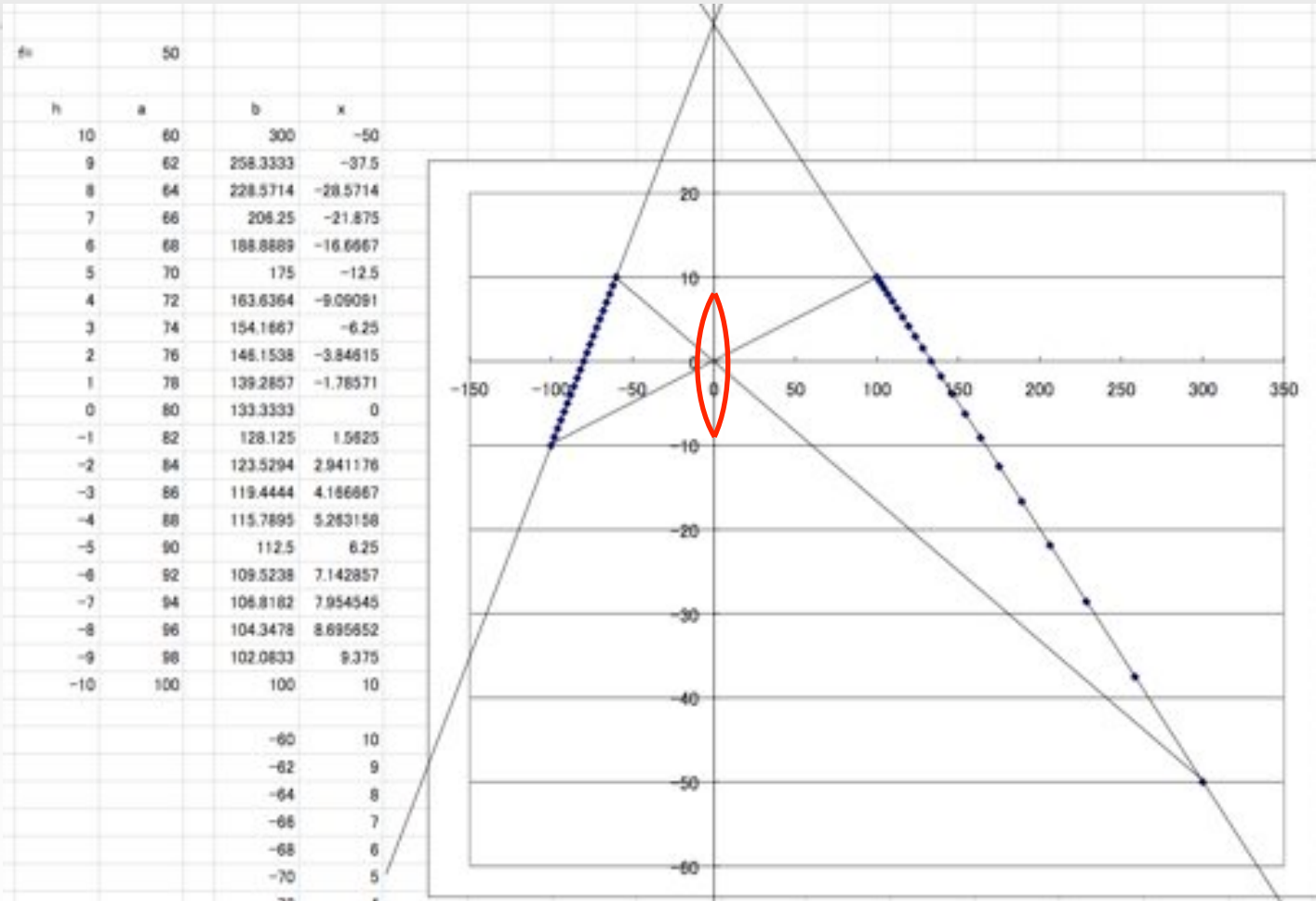
つまりこれらは1点で交わる.

# シャインフリュークの法則





# パース効果



- パース効果により，点の位置関係は非線形
- パース効果そのものは単なるピンホールカメラと同じ

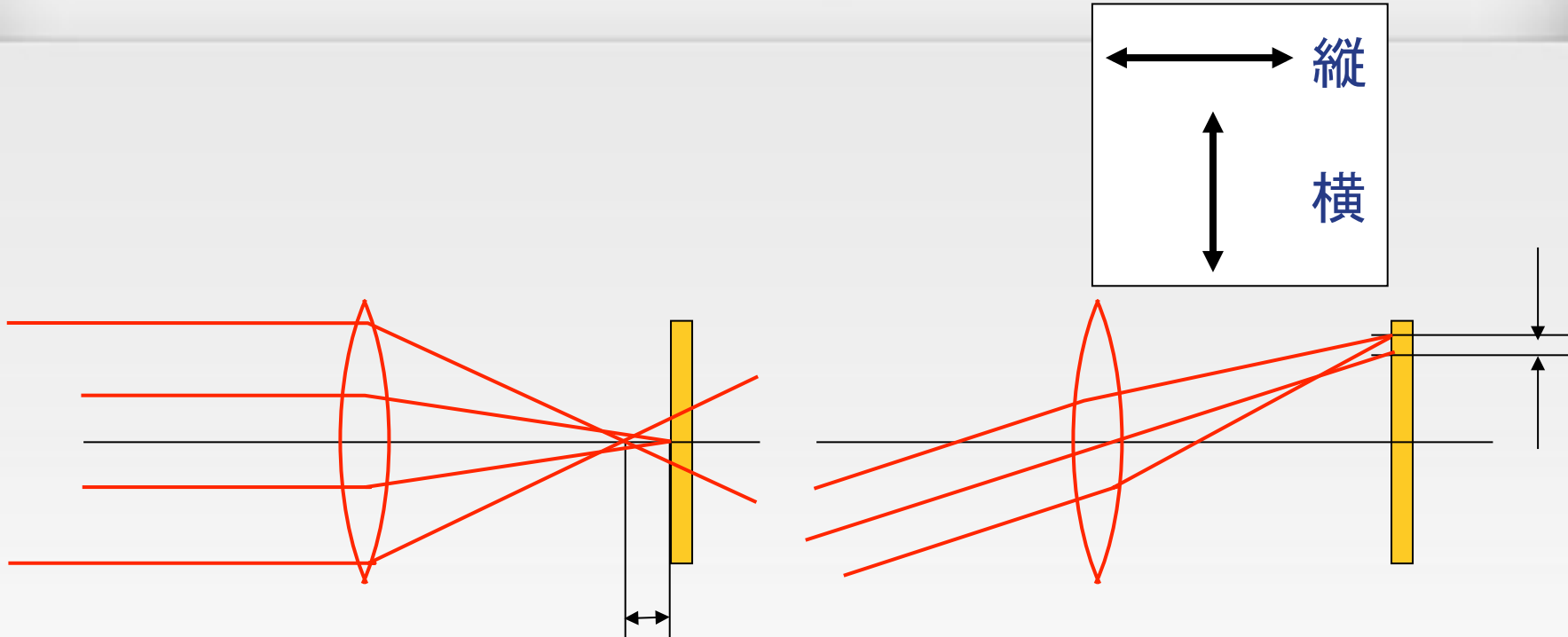




# ザイデルの5収差

- 入射光が1点に集まらない
  - 球面収差
  - コマ収差
- 像が平面にならない
  - 非点収差
  - 像面湾曲
- 像が歪む
  - 歪曲収差

# 縦収差と横収差



縦収差（軸上収差）  
例：球面収差

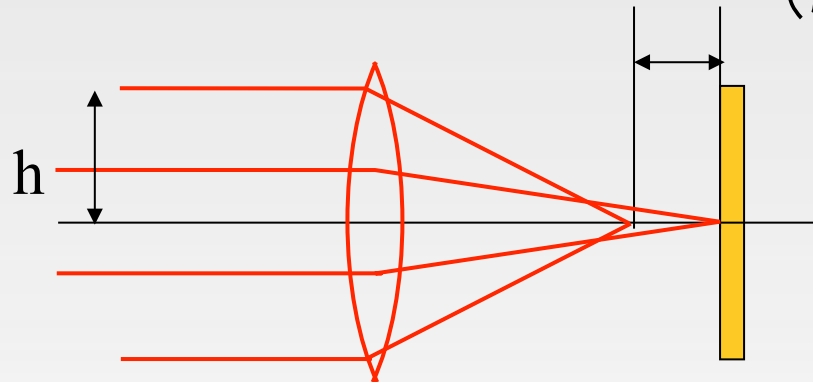
横収差  
例：コマ収差

- 収差は、縦収差と横収差の二種類に分類できる
  - 縦・・・光軸方向（奥行き方向）
  - 横・・・像高方向（画像面内の方向）



# 球面収差(1)

球面収差  
(縦収差)



入射高  $h$  に起因する縦収差

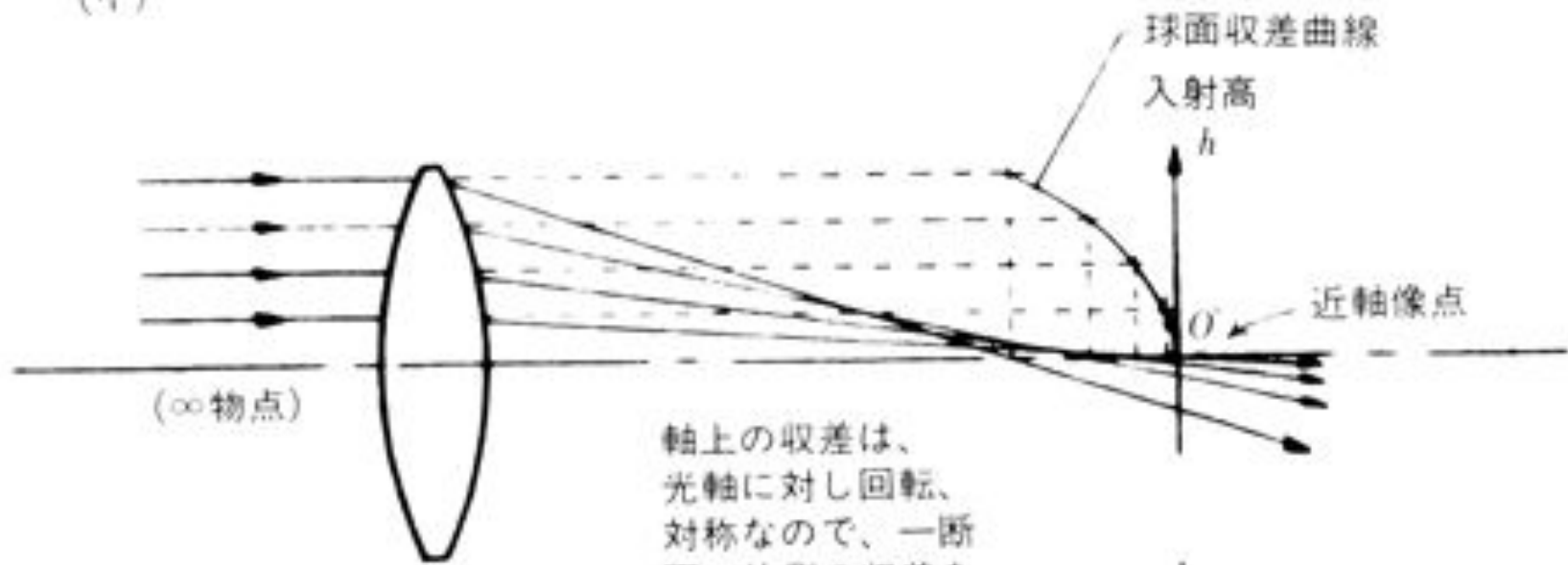
- 入射高  $h$  の違いによって結像点が縦にずれる現象 (画面中心の像の劣化の要因となる)
- 球面レンズの場合, 必ず発生する (非球面レンズで解決可能)
- 画面中心での量として記述される



# 球面収差(2)



(イ)



( $\infty$ 物点)

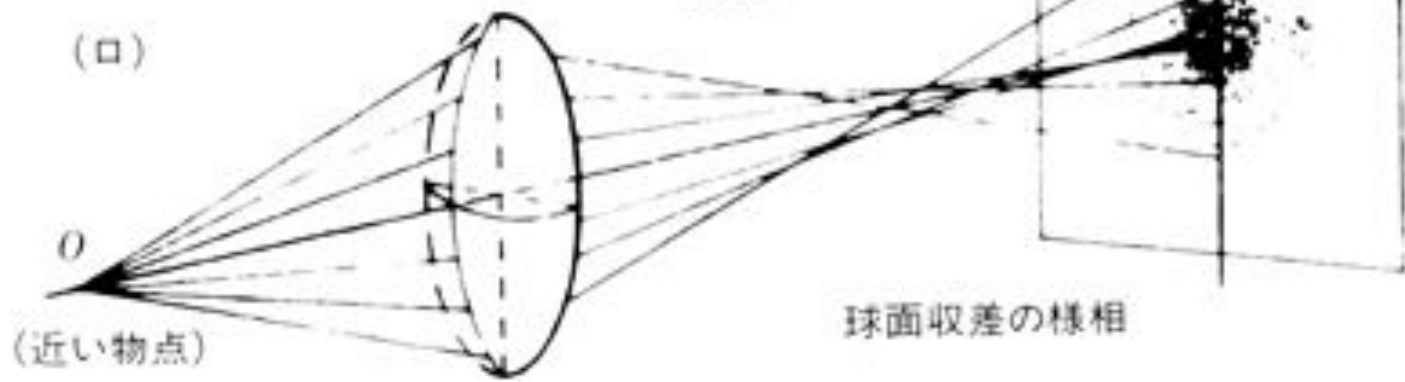
球面収差曲線

入射高  $h$

近軸像点

軸上の収差は、  
光軸に対し回転、  
対称なので、一断面の片側の収差を示すだけで十分である。

(ロ)

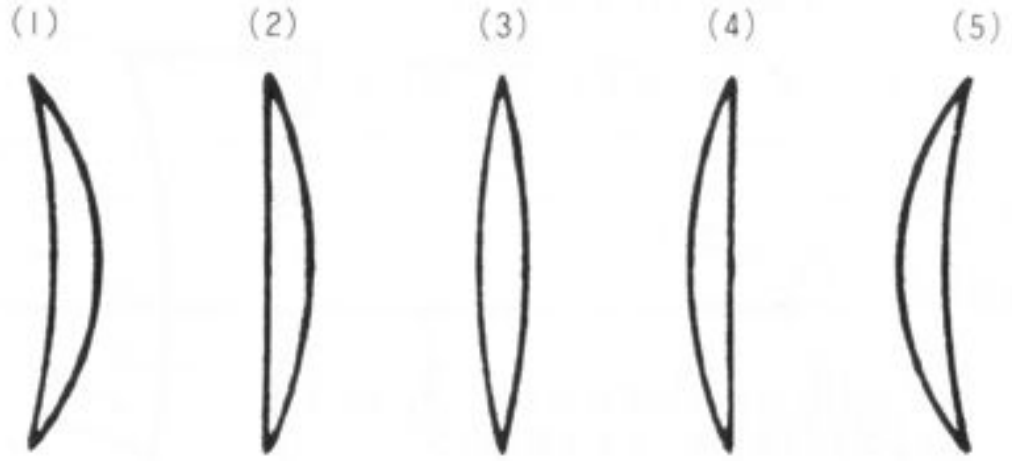


(近い物点)

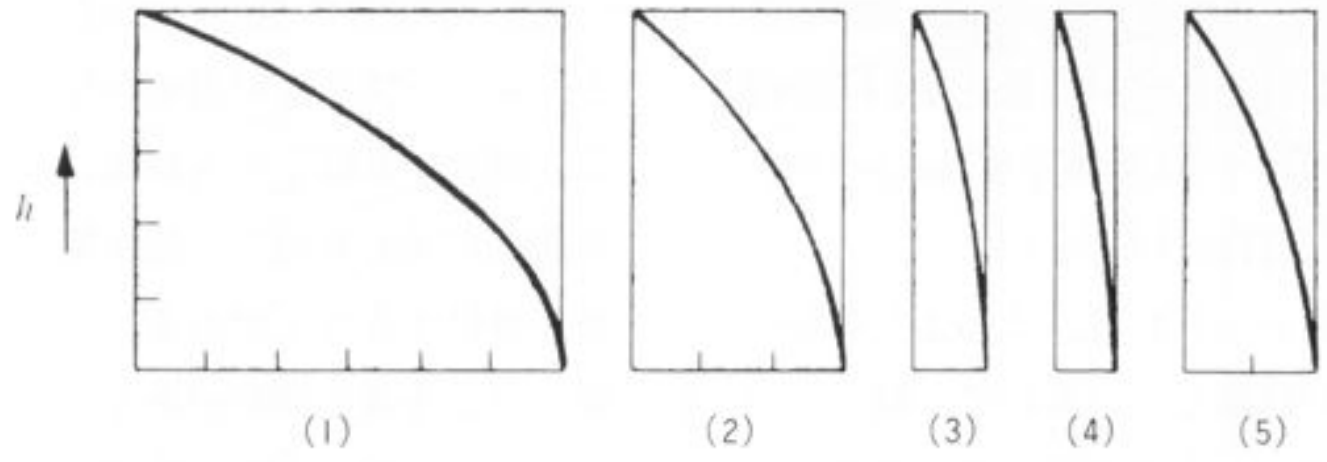
球面収差の様相



# 球面収差のコントロール(1)



レンズの形状を変えると  
球面収差はかなり変化する



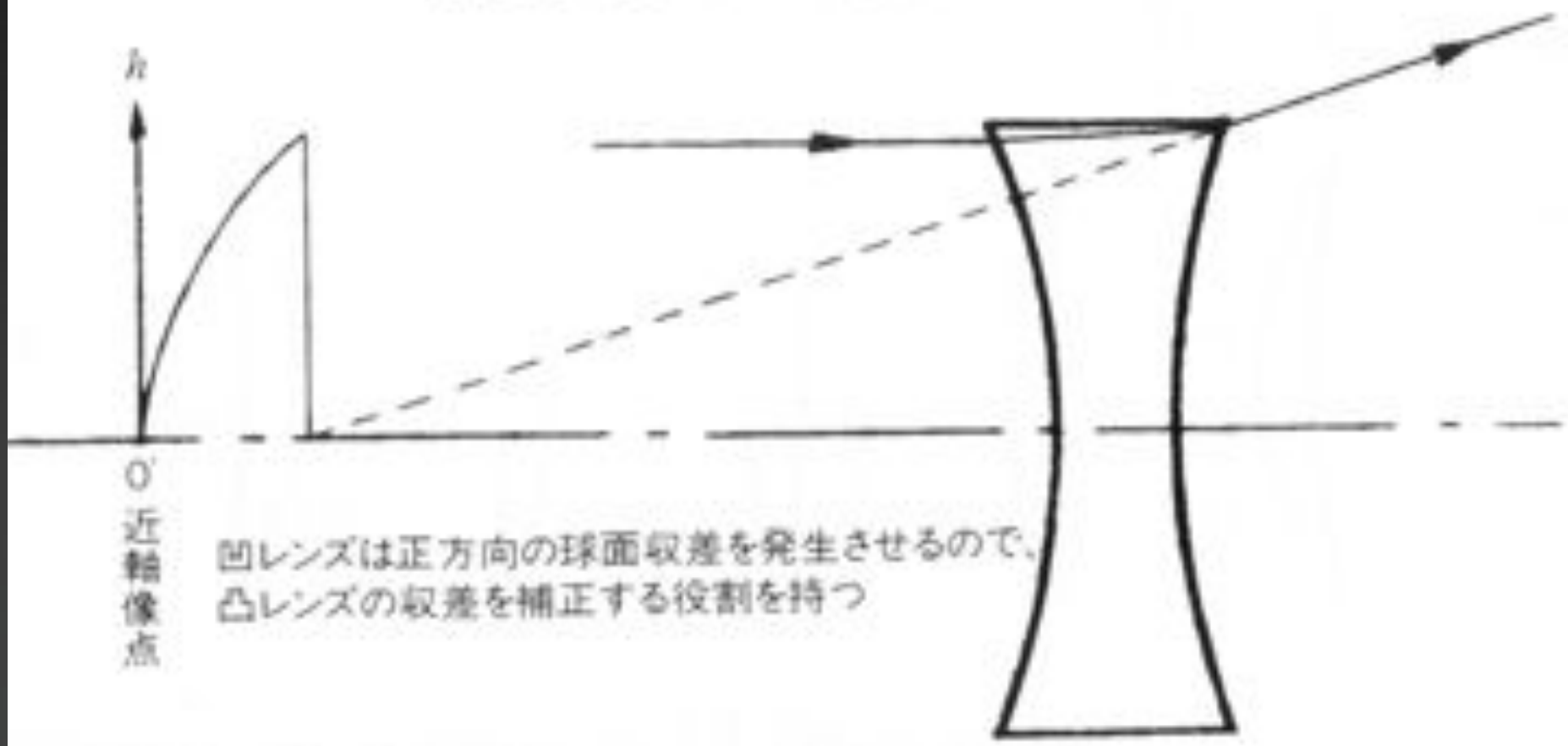
- レンズの変形 (ベンディング)
- レンズの屈折率と厚みのバランス
- レンズの分割 (薄いレンズ 2枚へ分割など)
- 凹レンズと凸レンズの組み合わせ



# 球面収差のコントロール(2)



図3・9 凹レンズの球面収差

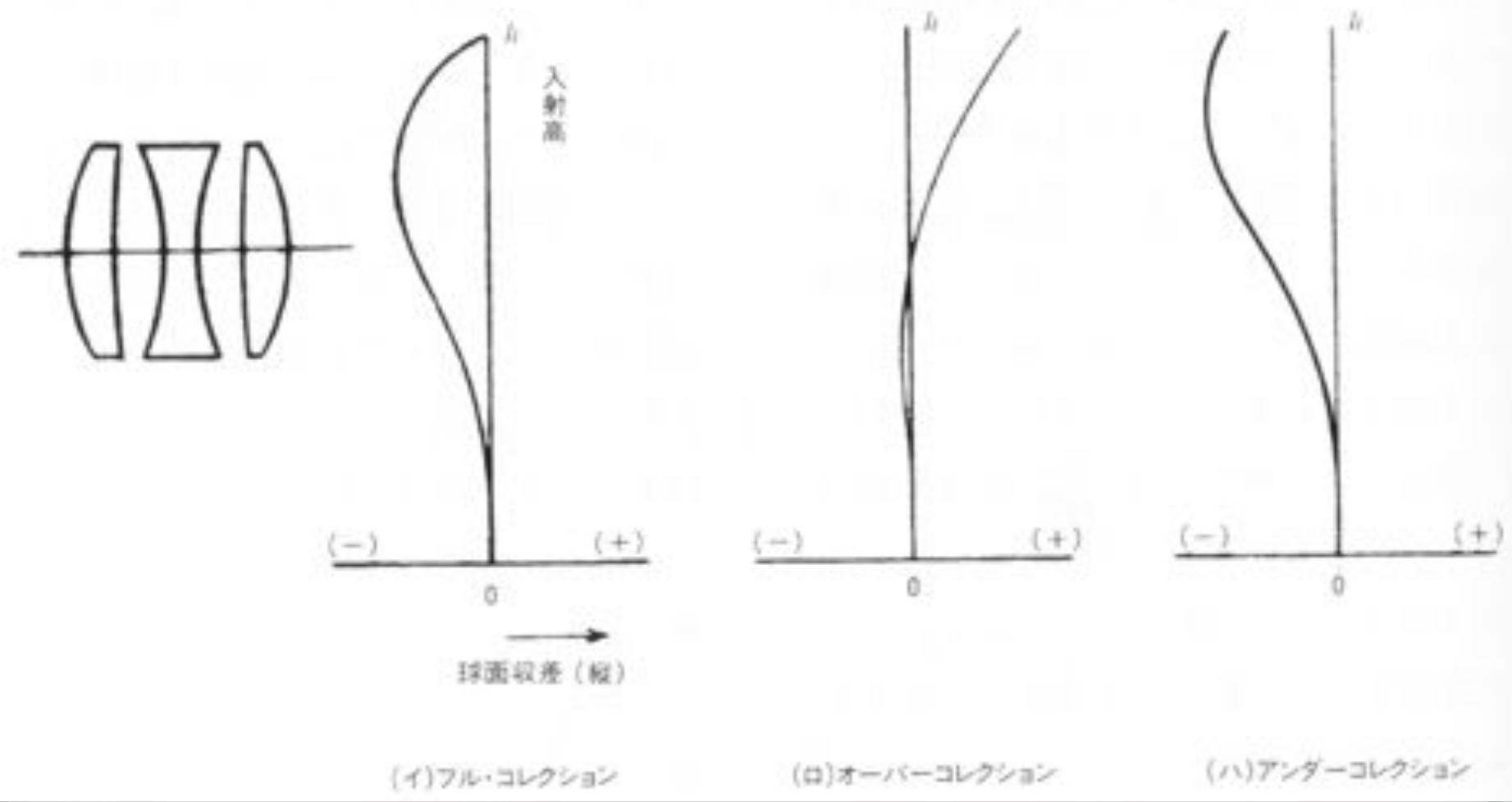




# 球面収差の例(1)



図3・10 球面収差曲線の例

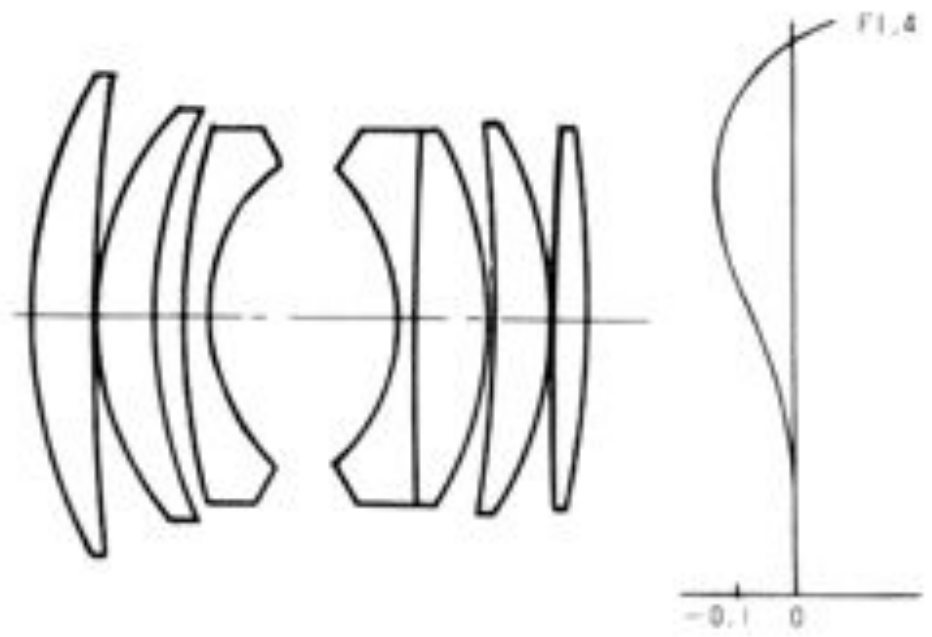




# 球面収差の例(2)



図3・12 50mm F1.4標準レンズの構成と球面収差

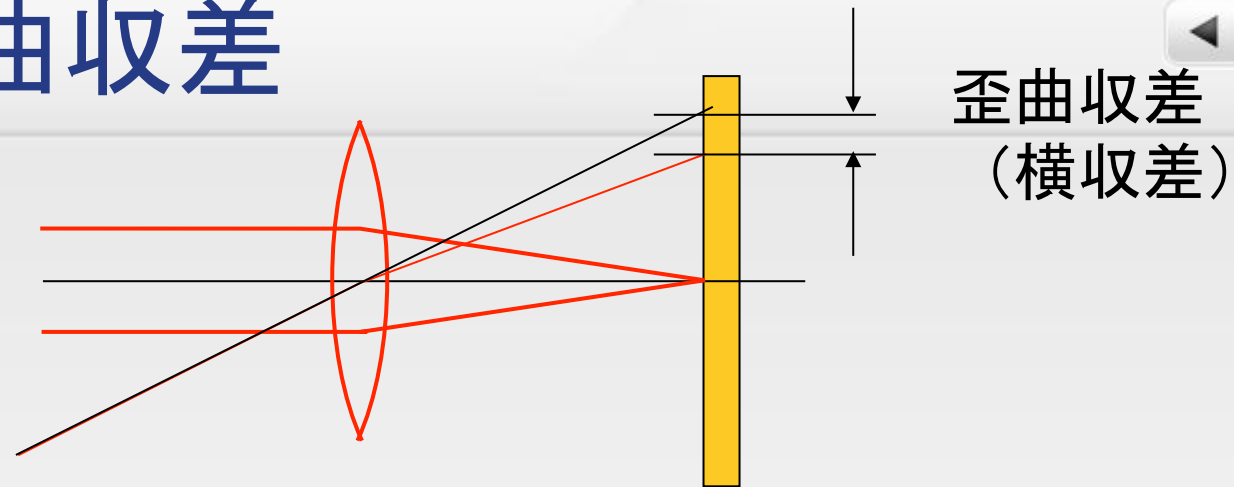


- 焦点距離 50mm に対し 0.1mm
  - 前後各 0.05mm F1.4 なので  
おおよそ許容錯乱円程度



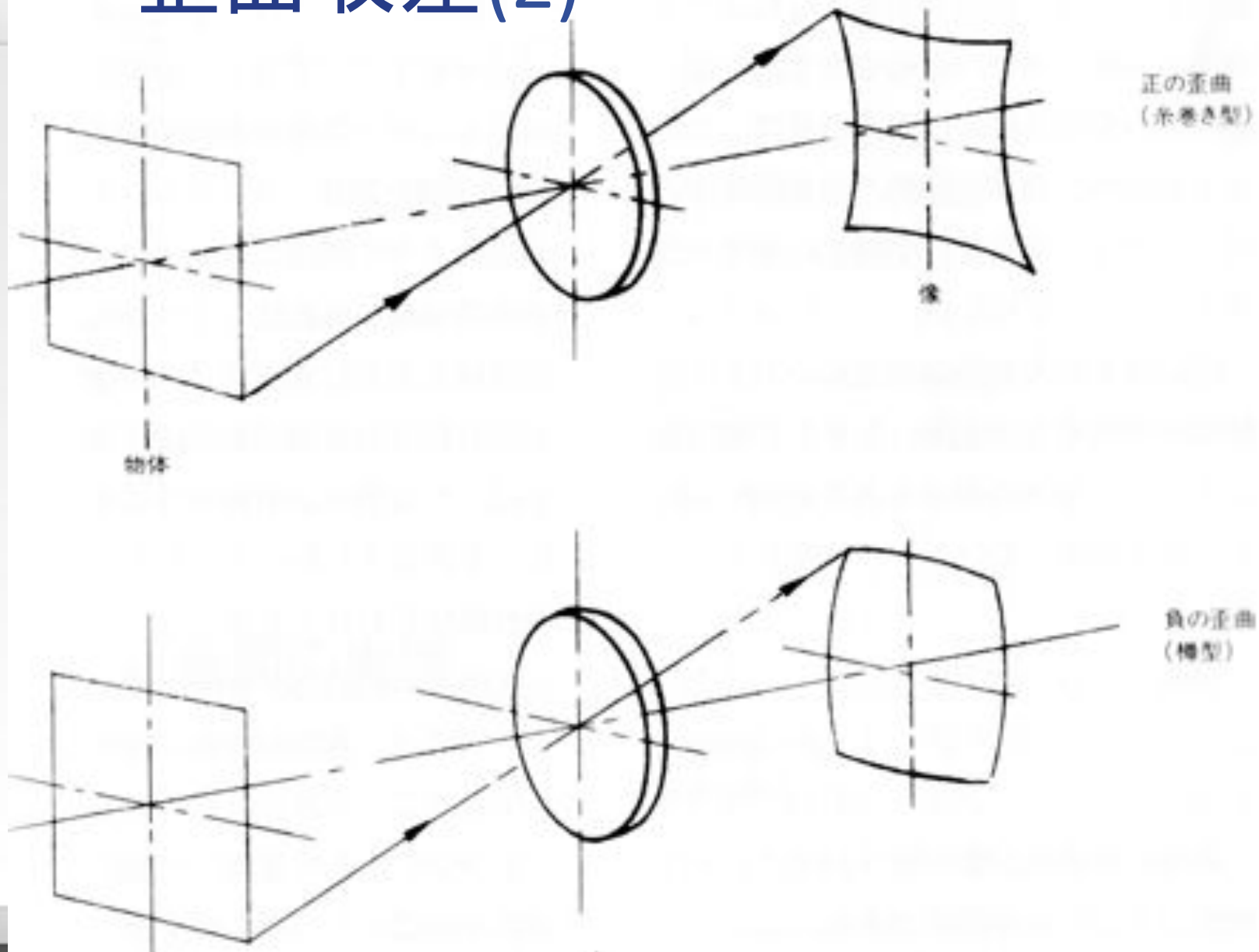


# 歪曲収差

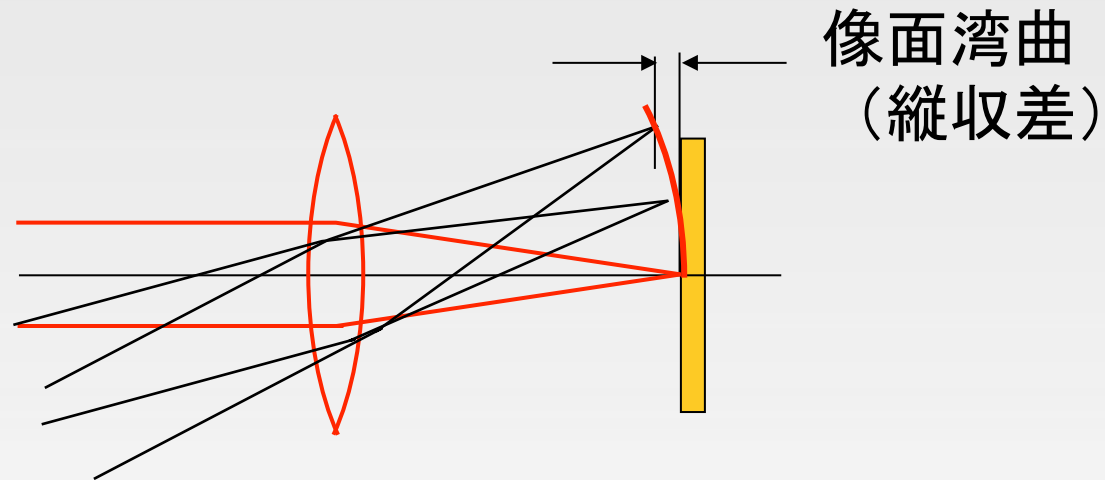


- 像高（画角）によって結像点が横にずれる現象（画面全体が歪む）
- 入射高  $h = 0$  （中心光束のみ）
- 通常の写真用レンズで許容されるのは2%程度まで
  - たる型収差のほうが目立ちにくく，好まれる

## 歪曲収差(2)

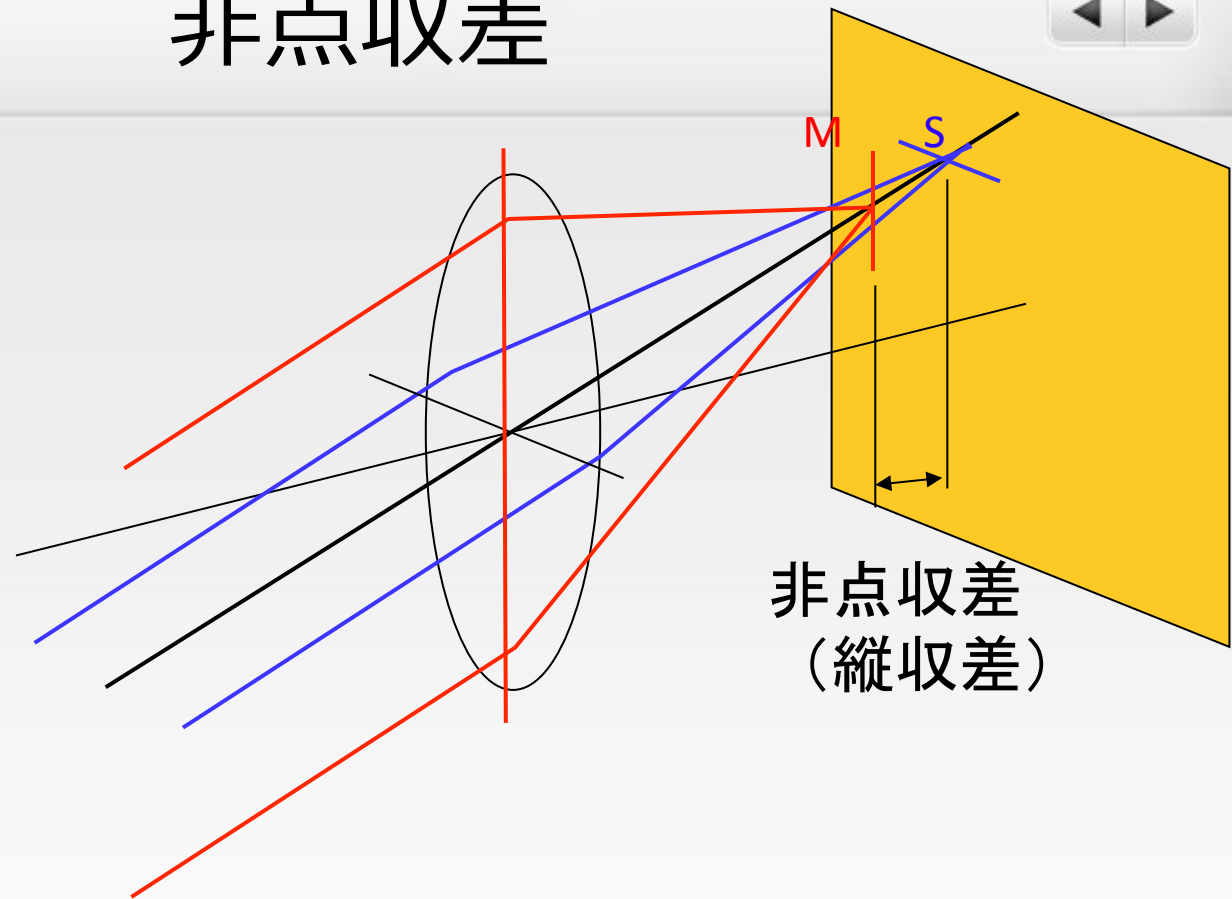


# 像面湾曲



- 像高(画角)によって結像点が縦にずれる現象  
(画面周囲のピンぼけを発生させる)
- 入射高  $h \rightarrow 0$ , つまり球面収差は関係ない
  - ただし, どの方向から極限を取るかによって変わってくる (次項の「非点収差」参照)

# 非点収差

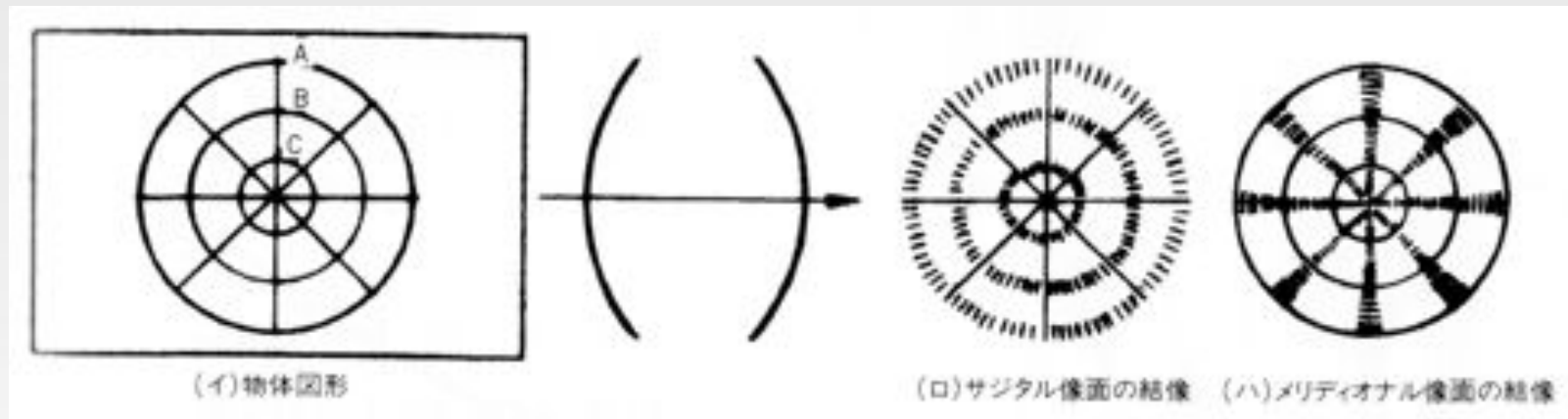


非点収差  
(縦収差)

- 入射高の方向によって結像点が縦にずれる現象  
(入射高を  $h \rightarrow 0$  としたとき)
  - 像高方向//入射高方向 **メリディオナル像面**
  - 像高方向 $\perp$ 入射高方向 **サジタル像面**



## 非点収差(2)



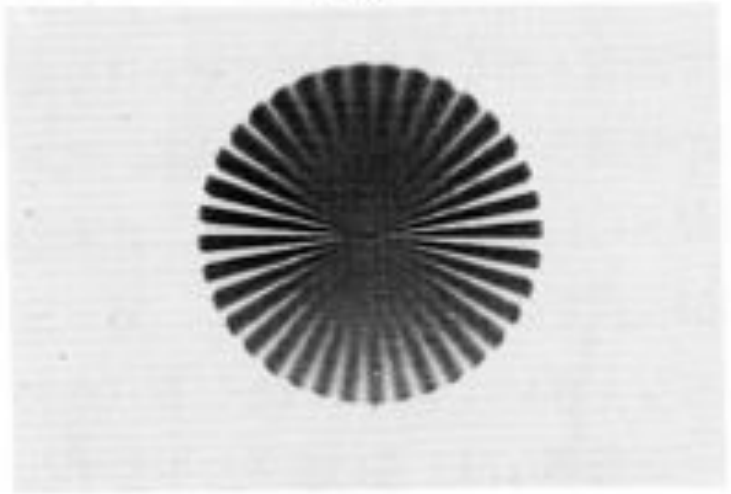
- メリディオナル (meridional)
  - 子午線の・経線の
- サジタル (sagittal)
  - 矢の・矢じり状の



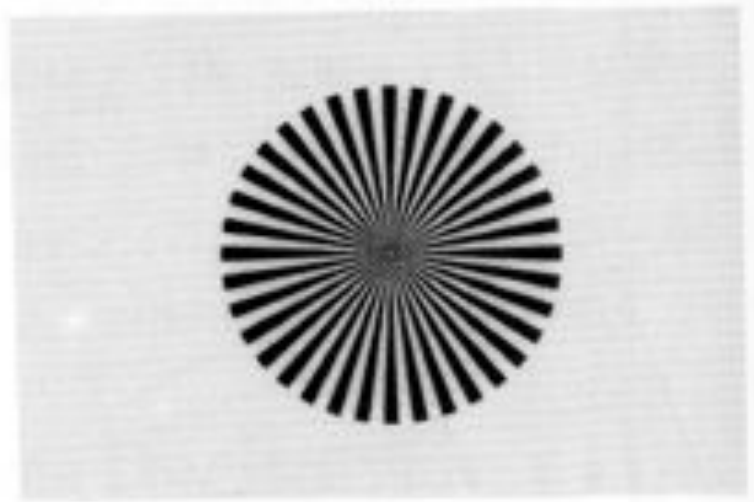
# 非点収差(3)



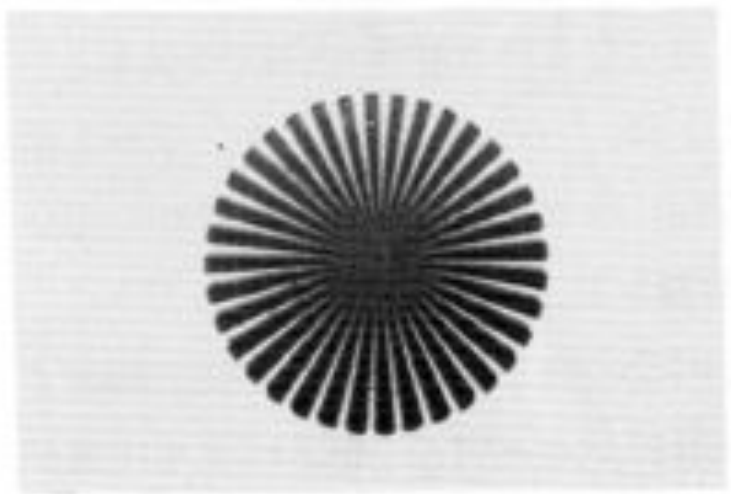
M像



物体



中間像



S像

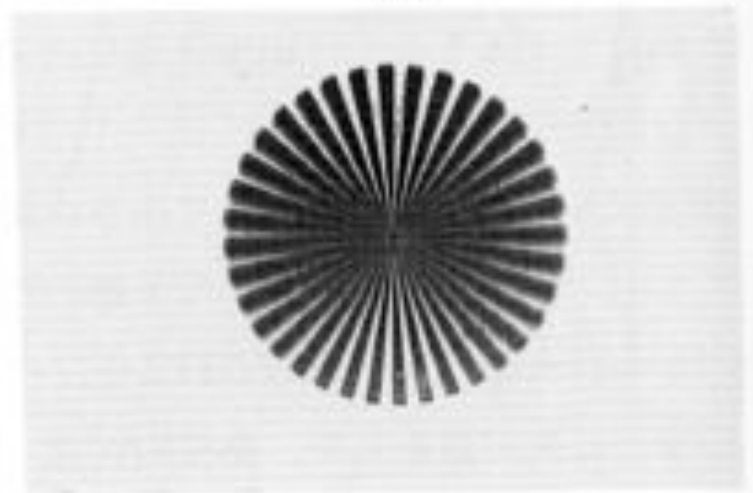
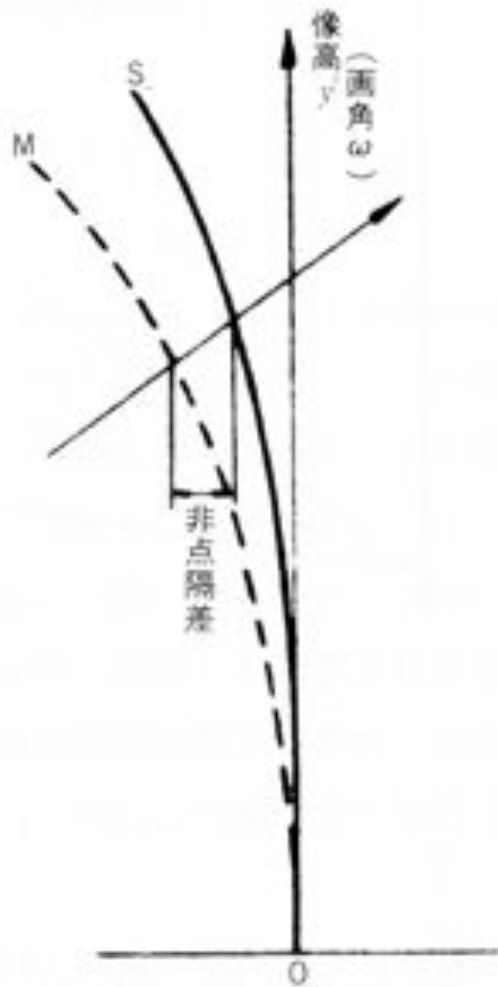


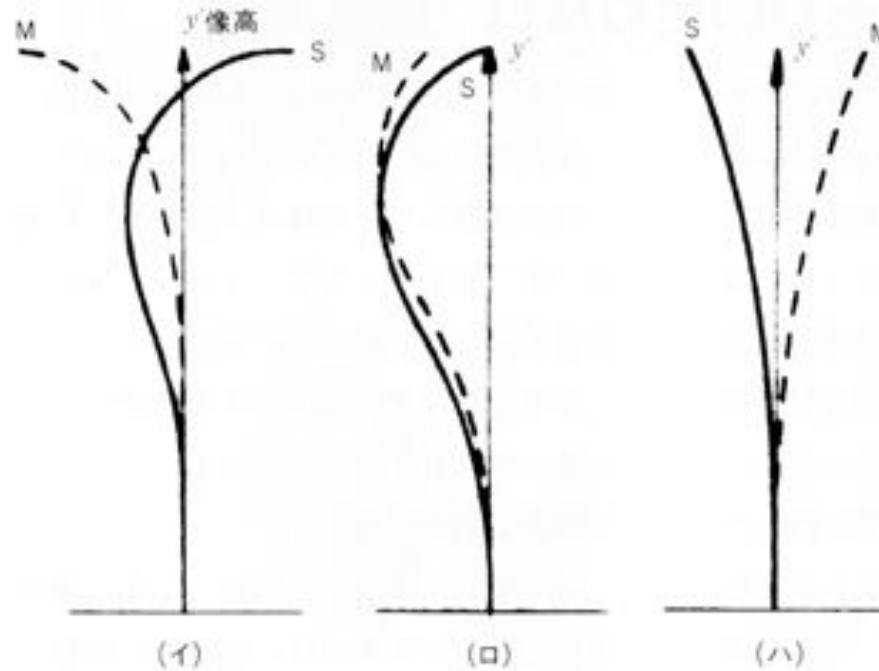
図3・18 非点収差曲線



# 非点較差

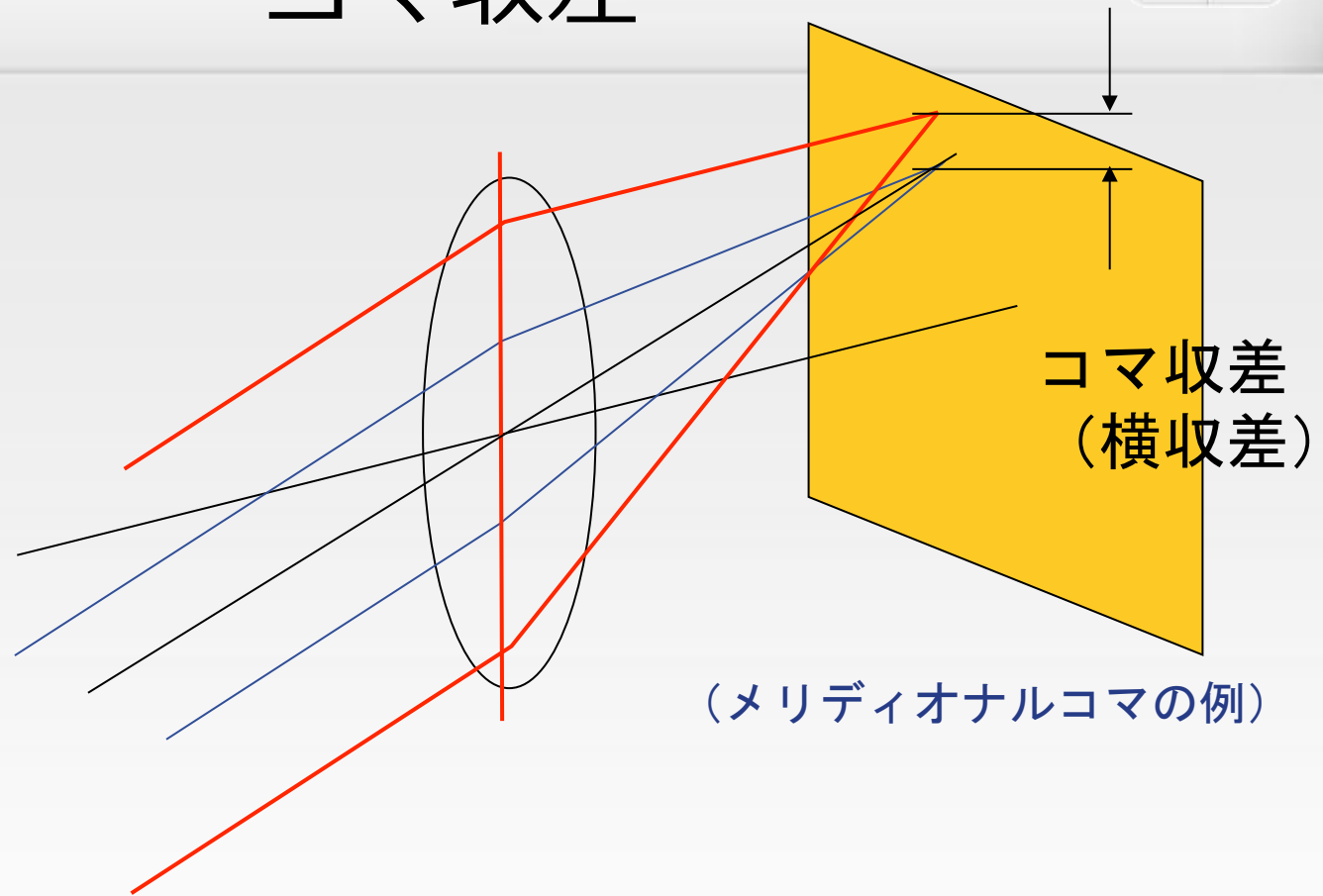


図3・20 像面特性の色々



- 感性的には、M像とS像は近いほうが良い
  - 像の「流れ」を生じにくい

# コマ収差



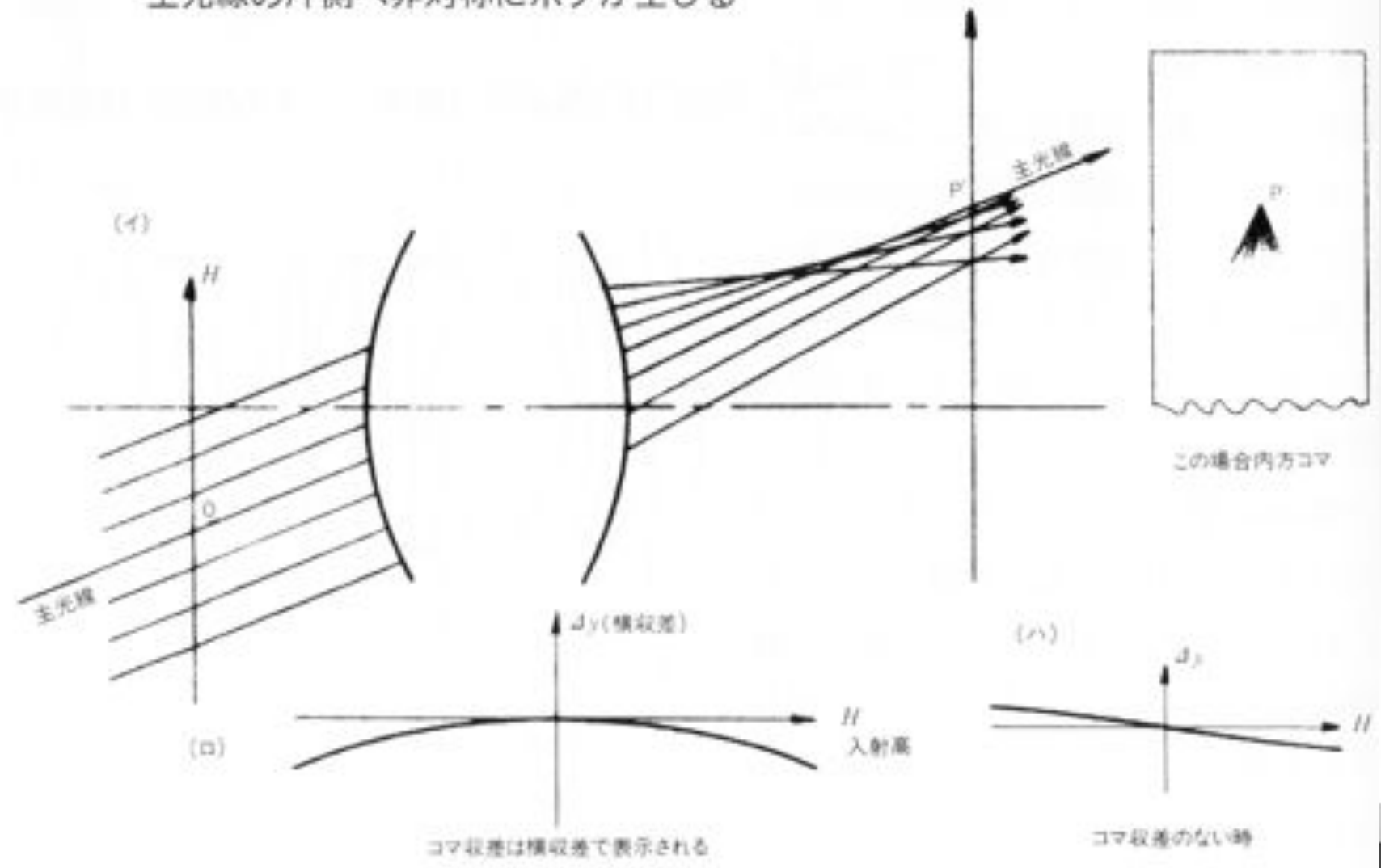
- 入射高によって結像点が**横**にずれる現象
  - 入射高//像高 メリディオナルコマ
  - 入射高 $\perp$ 像高 サジタルコマ





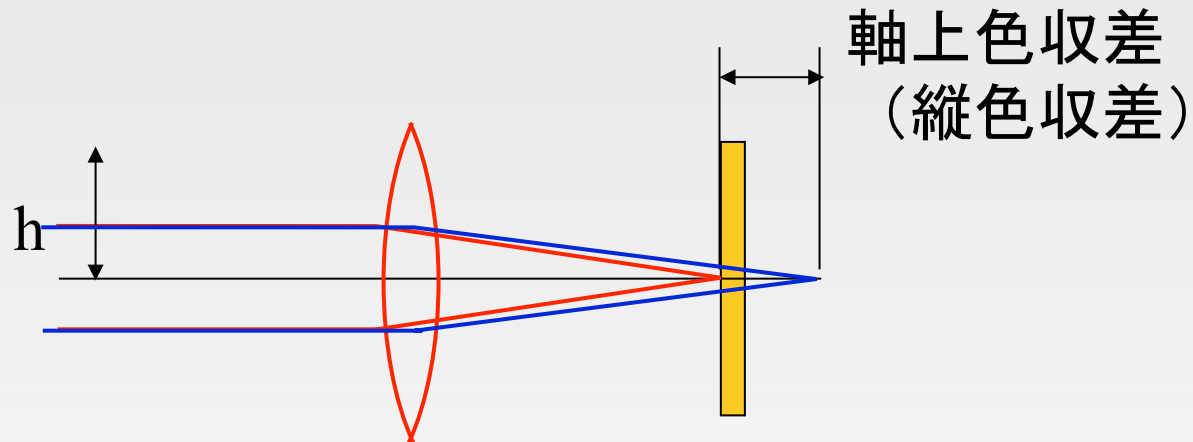
# コマ収差(2)

図3・13 典型的なコマ収差  
主光線の片側へ非対称にボケが生じる





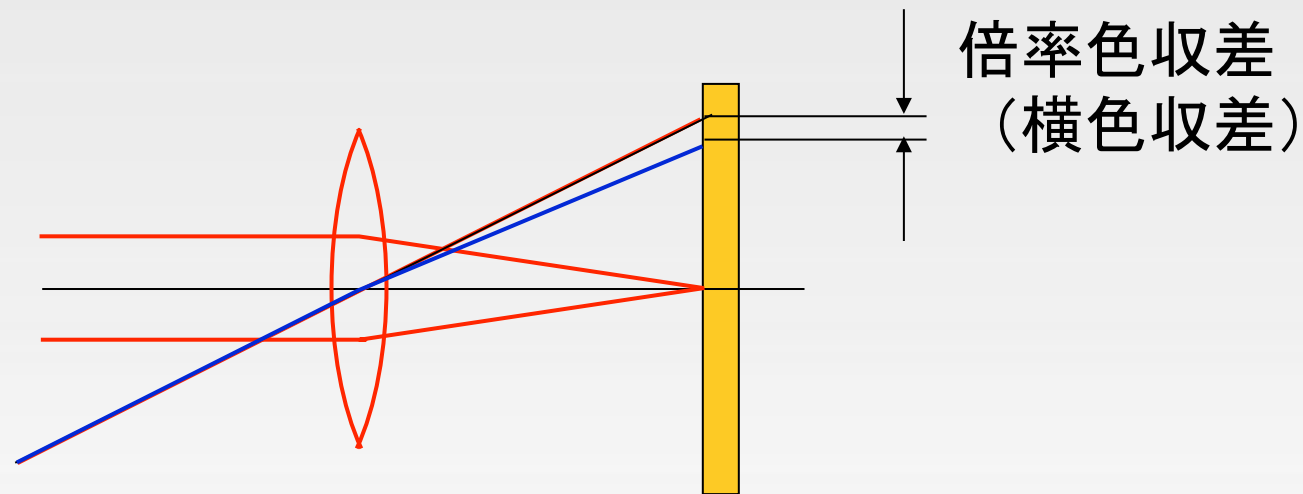
# 軸上色収差



- 縦に発生する色収差
- 波長によって（ガラスの屈折率が異なるため）焦点距離が変化する現象
- 画面中央の像が劣化する



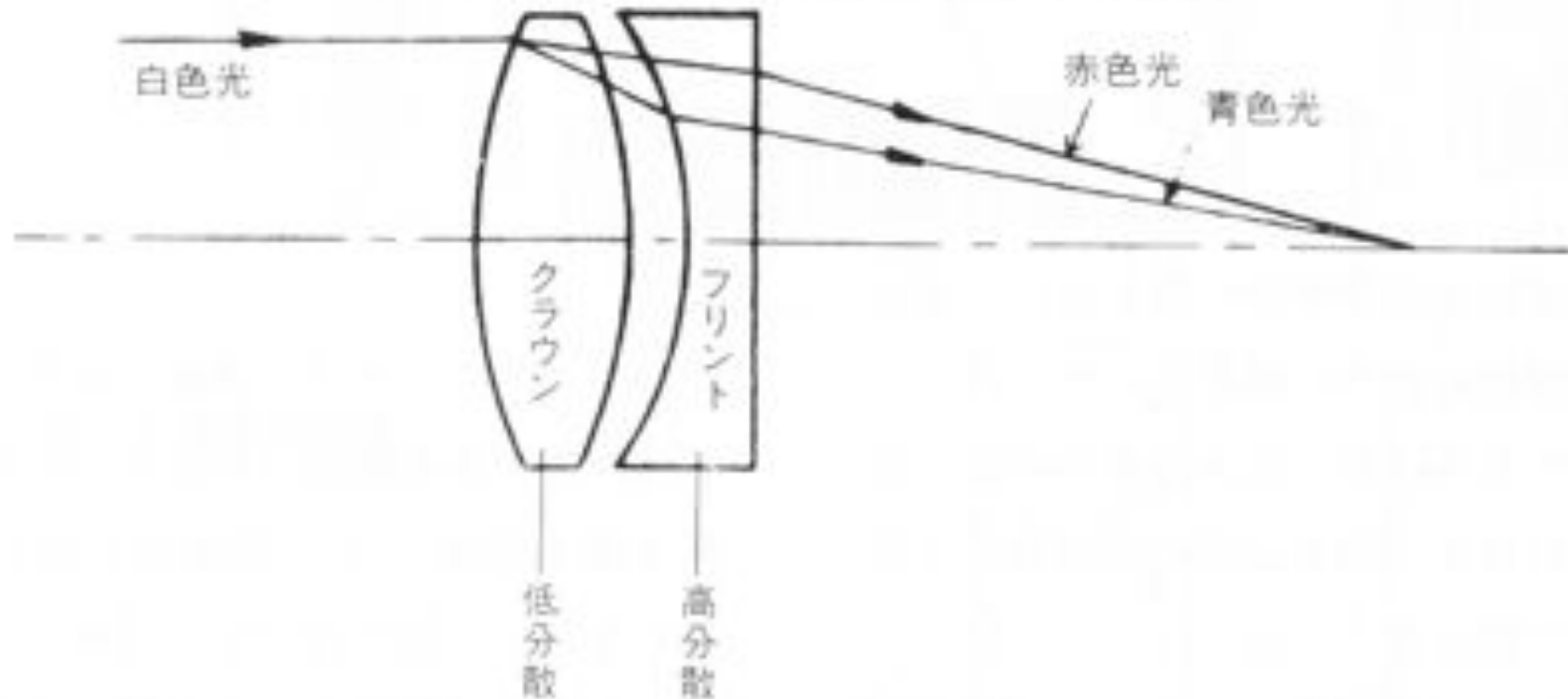
# 倍率色収差



- 画角によって画像の大きさが変化する収差
  - 画像の周辺部で色のにじみを生じる  
(中心部は無関係)

# 色収差の補正

図3・3 毒をもって毒を制す色消しの原理



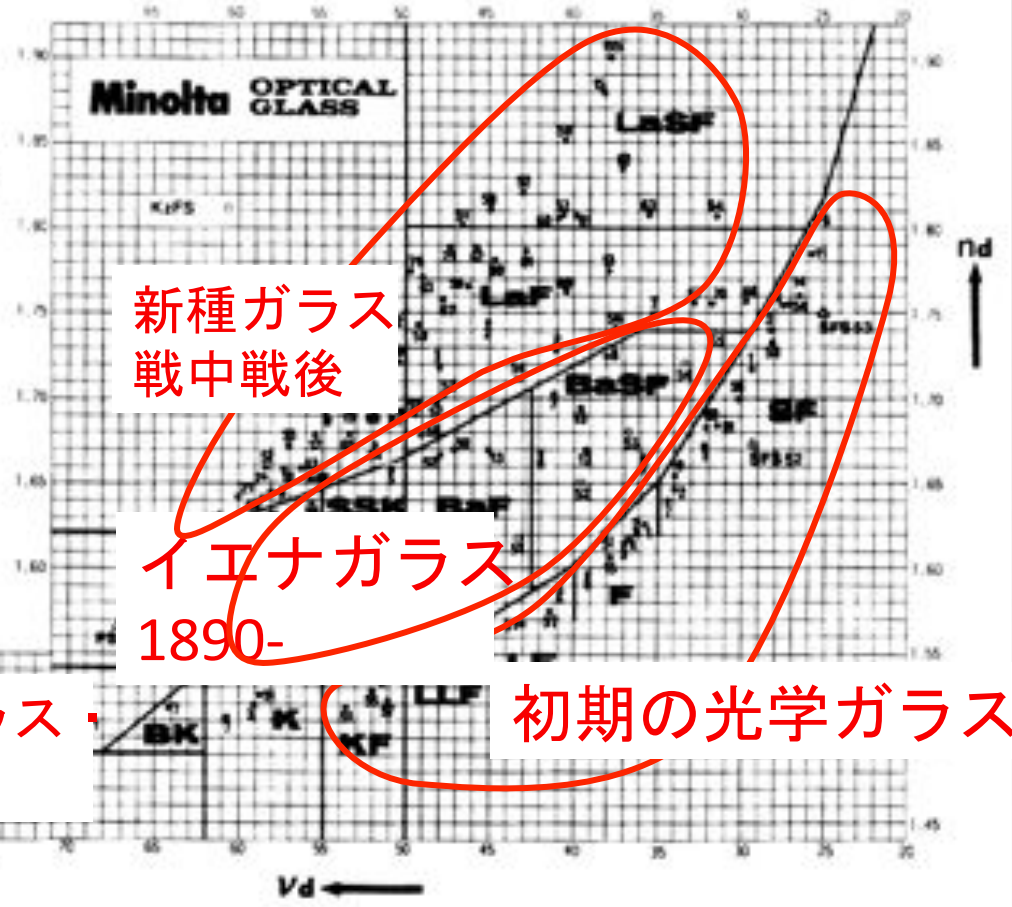
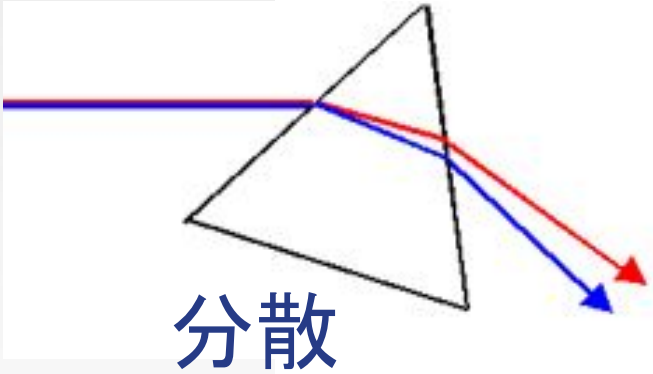
- 分散の違う2種類のガラスで色収差を相殺
- ただし非線形成分は相殺できない



# 光学ガラスの定数



図2・6 光学ガラスチャート



異常分散ガラス  
蛍石 1970-

新種ガラス  
戦中戦後

イエナガラス  
1890-

初期の光学ガラス

- 基本的には2つの定数（屈折率・分散）で表す



# 光学ガラス



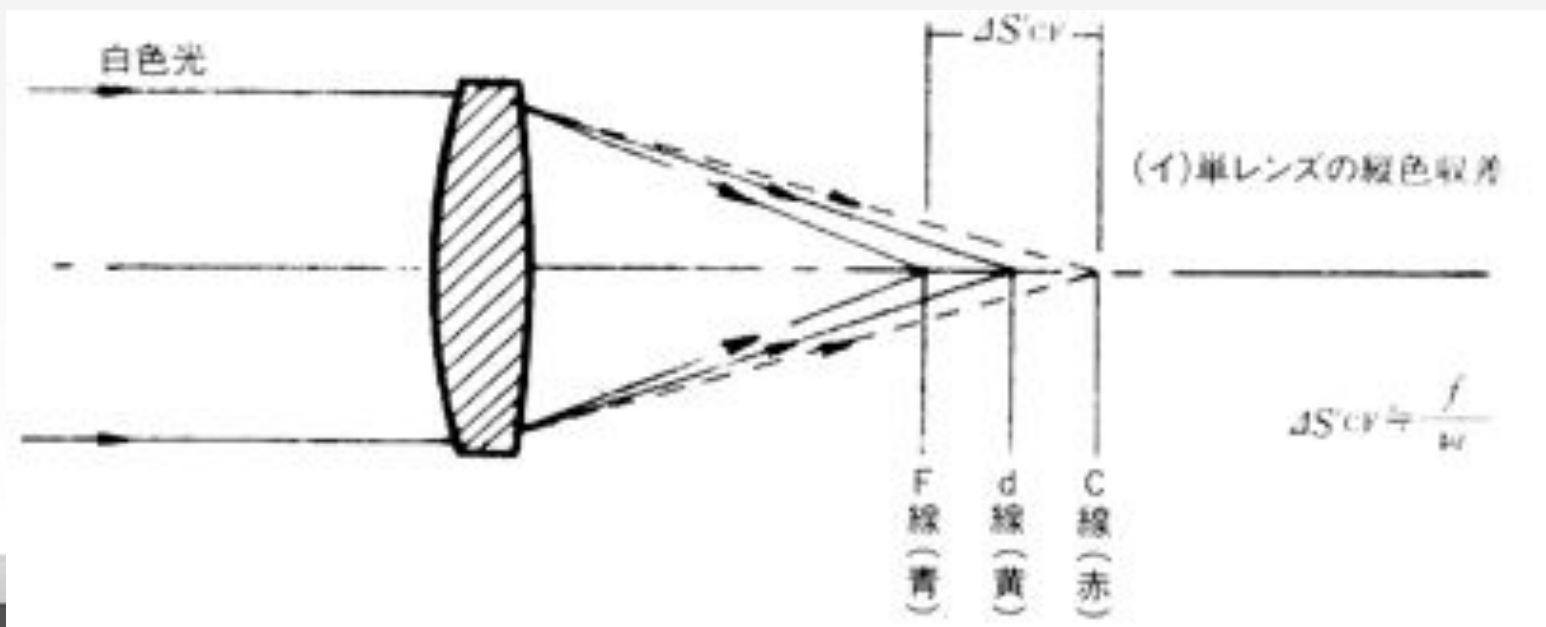
表2-1 光学ガラスの例

名 称	記号	代表例	屈折率 $nd$	アッベ数 $vd$	主な成分 (多い順に)
重 フ リ ン ト	SF	SF 6	1.80518	25.43	PbO, SiO <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> O
フ リ ン ト	F	F 2	1.62004	36.37	SiO <sub>2</sub> , PbO, K <sub>2</sub> O
軽 フ リ ン ト	LF	LF 1	1.57309	42.58	SiO <sub>2</sub> , PbO, K <sub>2</sub> O
バリウムフリント	BaF	BaF10	1.67003	47.11	BaO, SiO <sub>2</sub> , B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
バリウムクラウン	BaK	BaK 1	1.57250	57.55	SiO <sub>2</sub> , BaO, ZnO
重 ク ラ ウ ン	SK	SK16	1.62041	60.33	BaO, SiO <sub>2</sub> , B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
硼 珪 ク ラ ウ ン	BK	BK 7	1.51680	64.17	SiO <sub>2</sub> , B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O
カルツフリント	KzF	KzF 1	1.55115	49.68	SiO <sub>2</sub> , Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> O
ランタンフリント	LaF	LaF 2	1.74400	44.77	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , PbO
ランタンクラウン	LaK	LaK10	1.72000	50.41	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO

- ただのガラスとは大きく組成が違います  
鉛, 珪素, カリウム, 亜鉛, ナトリウム, ランタン, ...

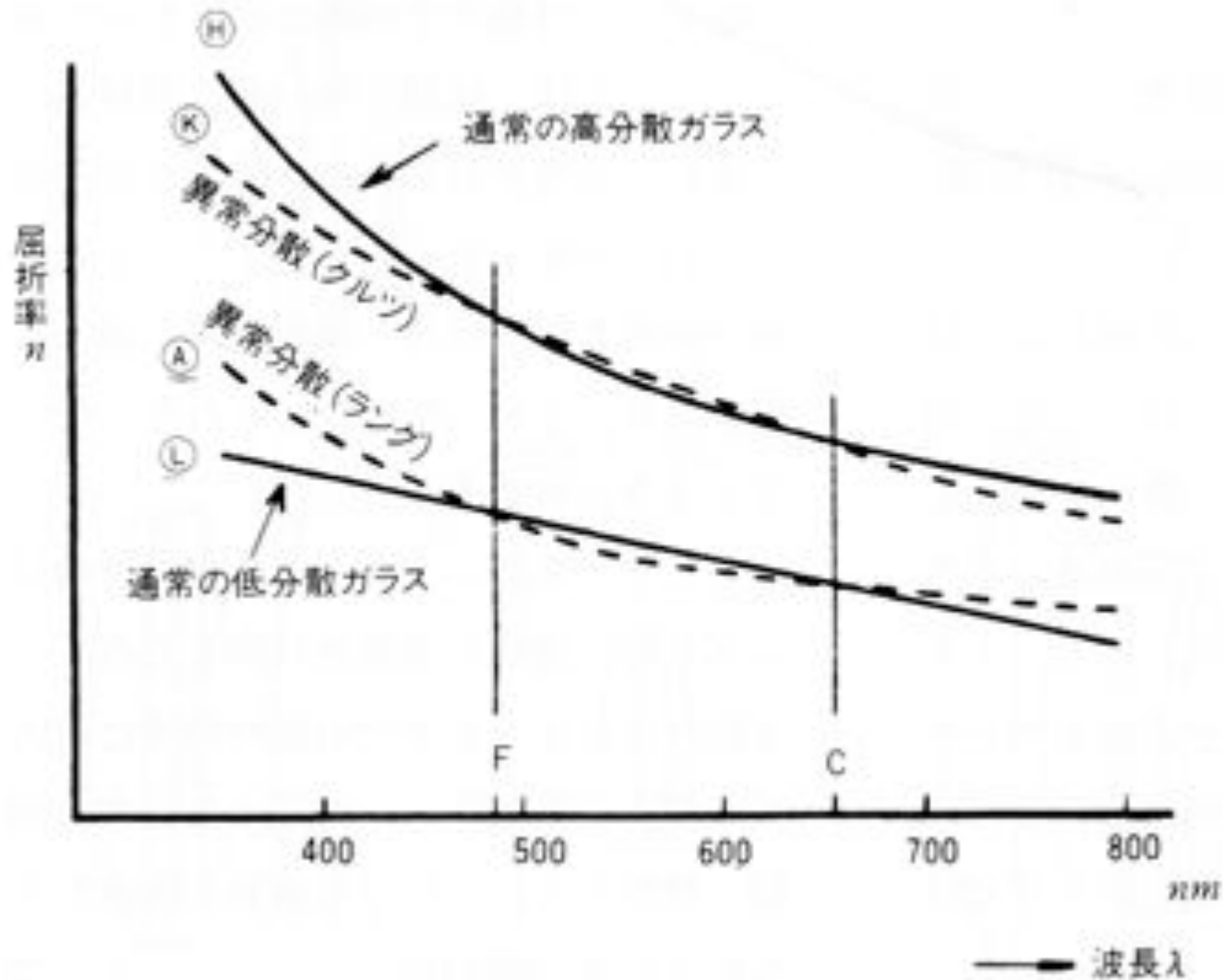
# なぜいろいろなガラスが要るのか

- 単色収差補正のため
  - 屈折率が高く薄いガラスと、屈折率が低くて厚いガラスは収差特性が異なる
- 色収差補正のため



# 二次色収差の補正

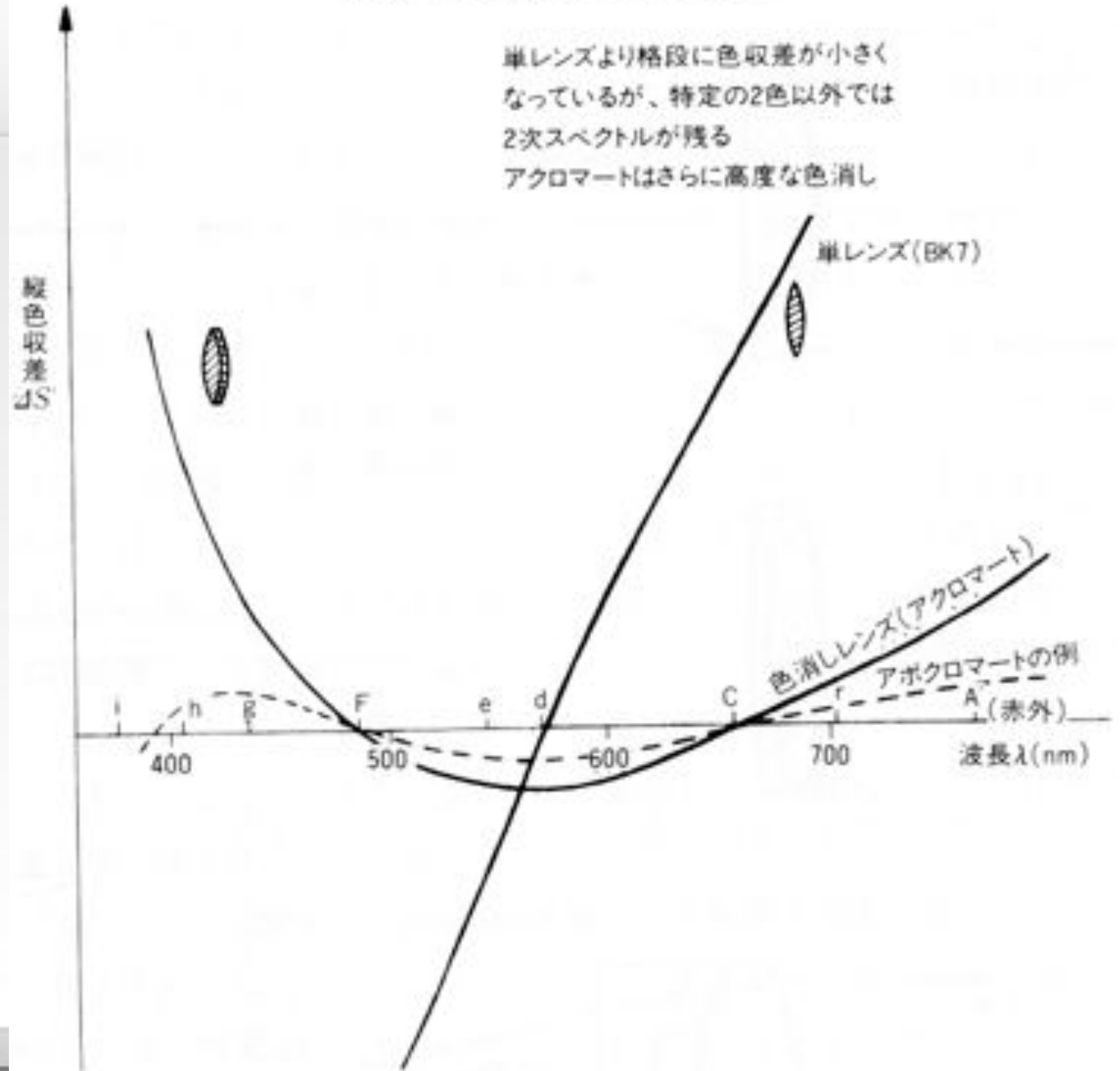
図8・6 異常分散性の模式的な説明





# 色収差の補正

図3-4 色消しレンズの効果





# ザイデル5収差の分類



	原因	縦収差	横収差
単色収差	入射高 (光束の太さ)	球面収差	コマ収差
	像高 (画角)	{ 像面湾曲 非点収差	歪曲収差
色収差		軸上色収差	倍率色収差



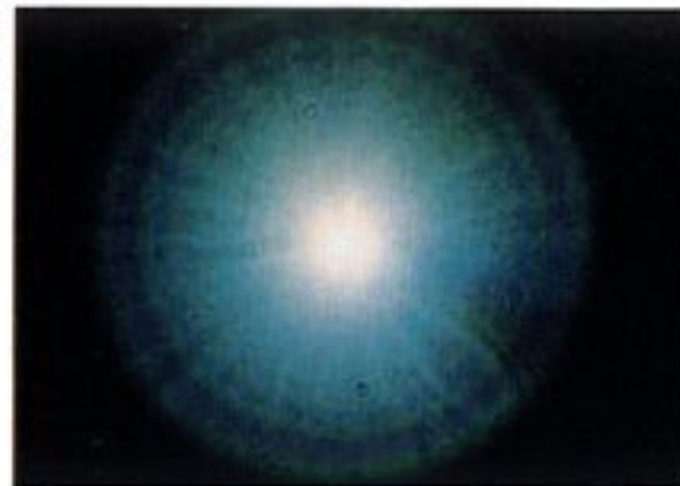
# 収差の実例(1)



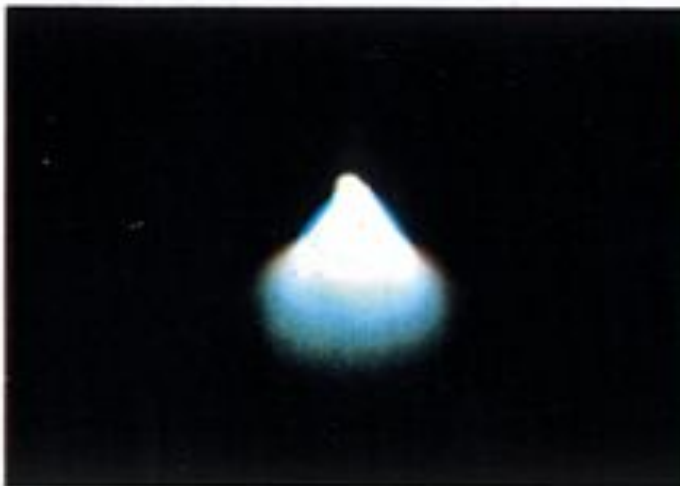
点光源の像に現れた収差 (約100倍に拡大)



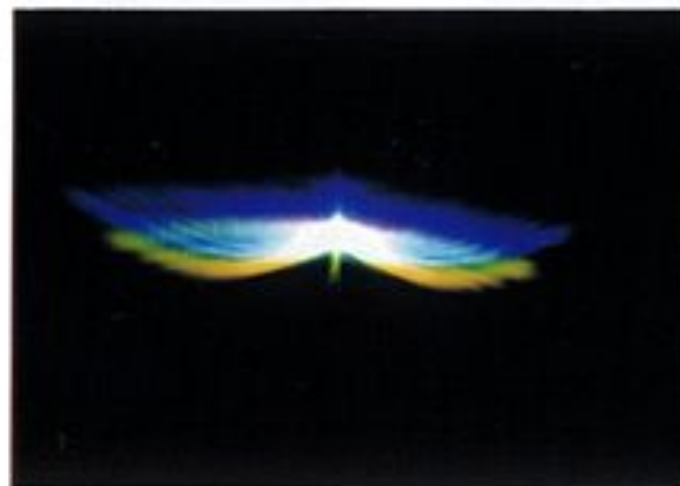
縦色収差



球面収差



コマ収差



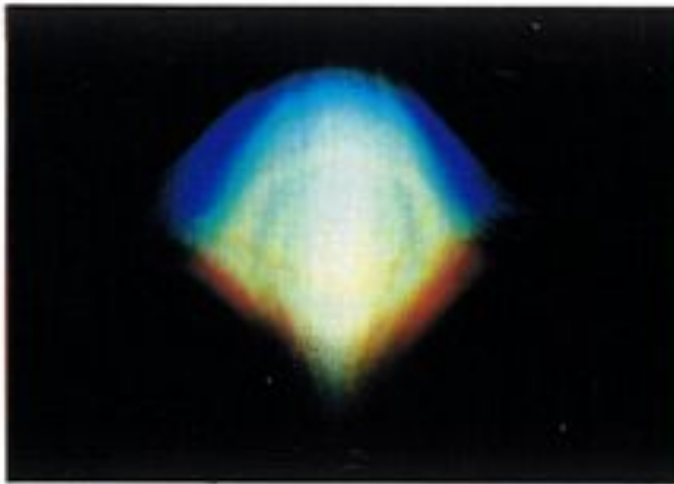
コマ収差



# 収差の実例(2)



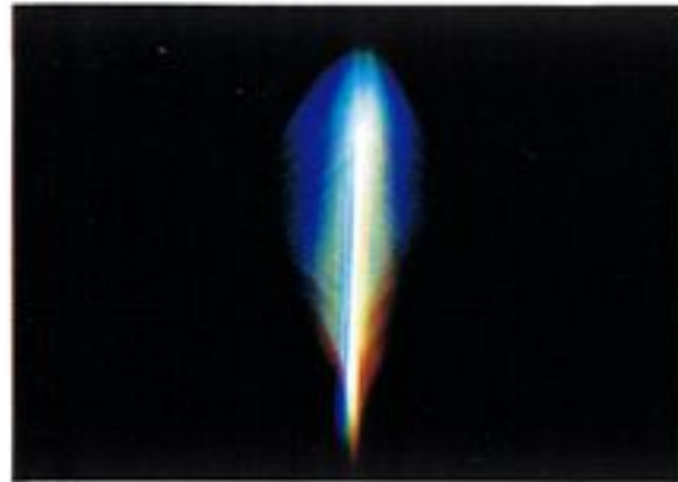
非点収差



中間像



M像 (倍率色収差も見える)



S像