

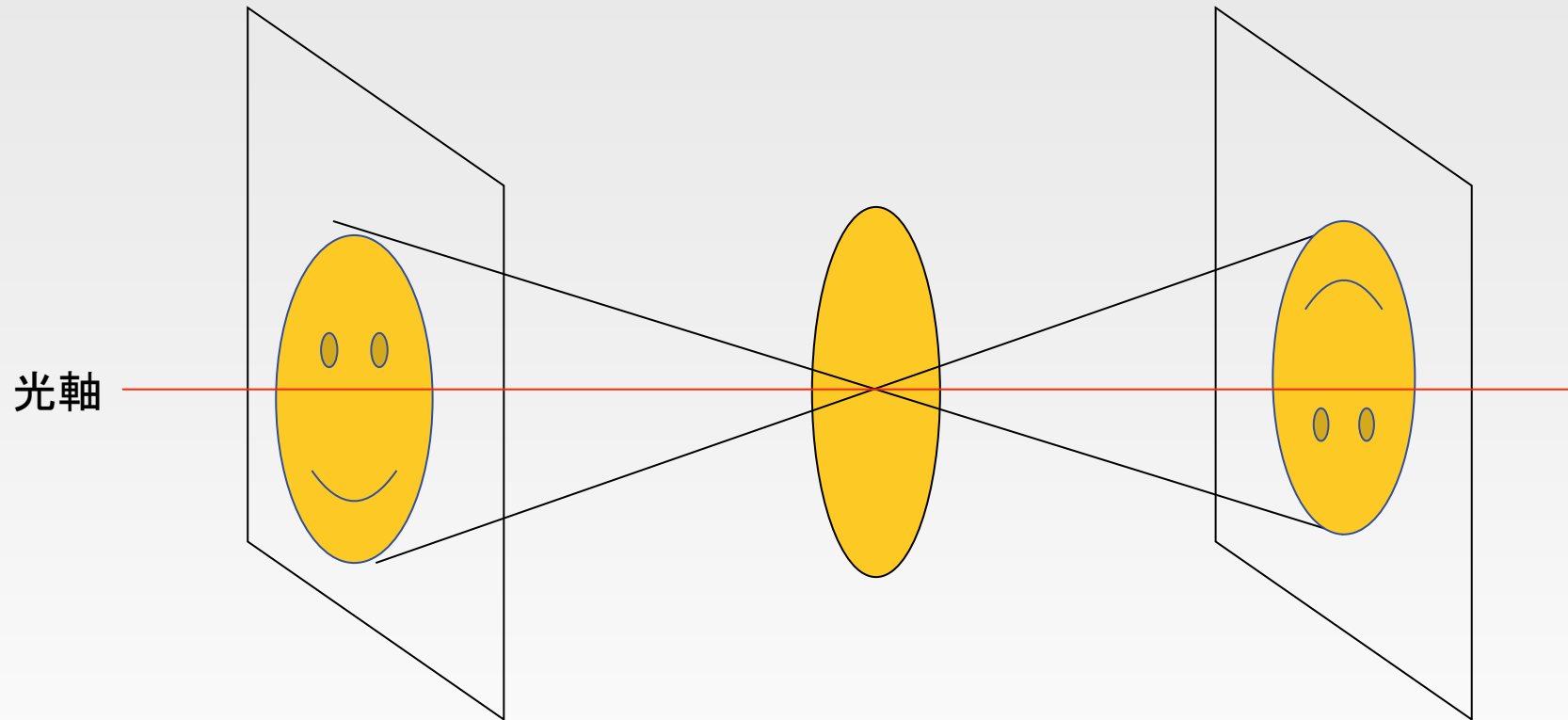


カメラとレンズの話





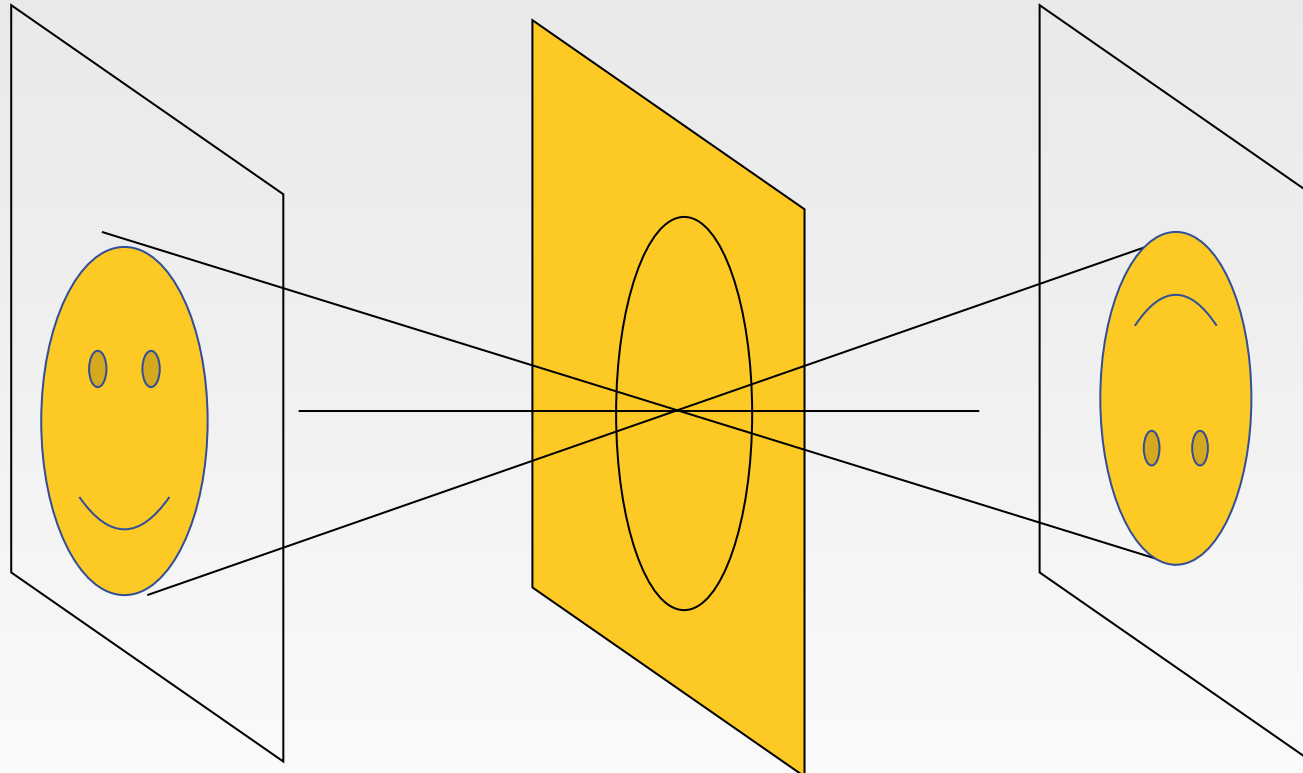
理想的な画像センサとは



- 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



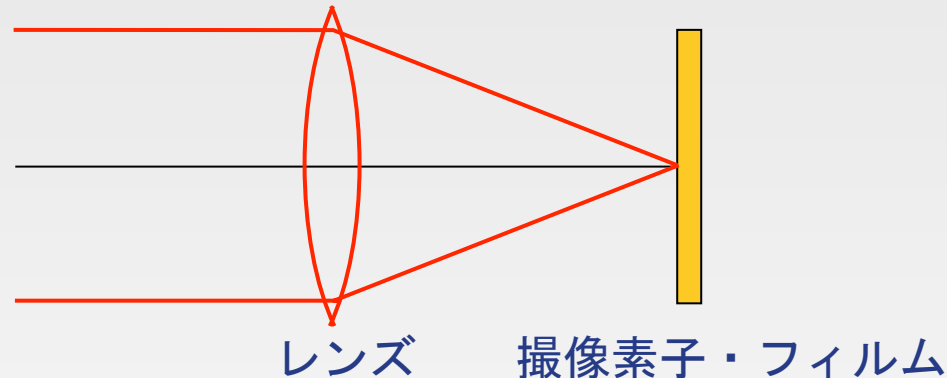
ピンホールカメラ



- 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



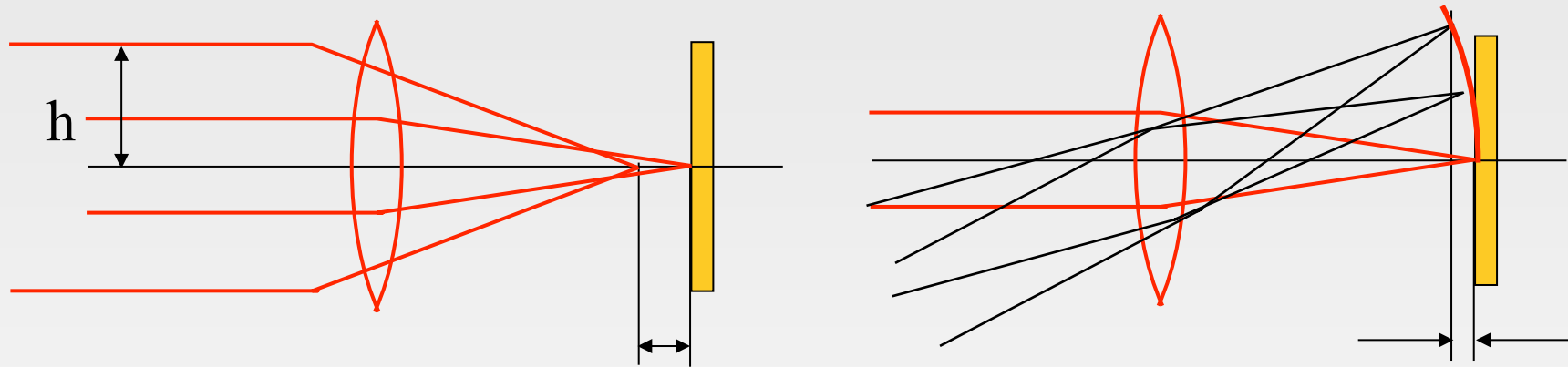
レンズの役割



- 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

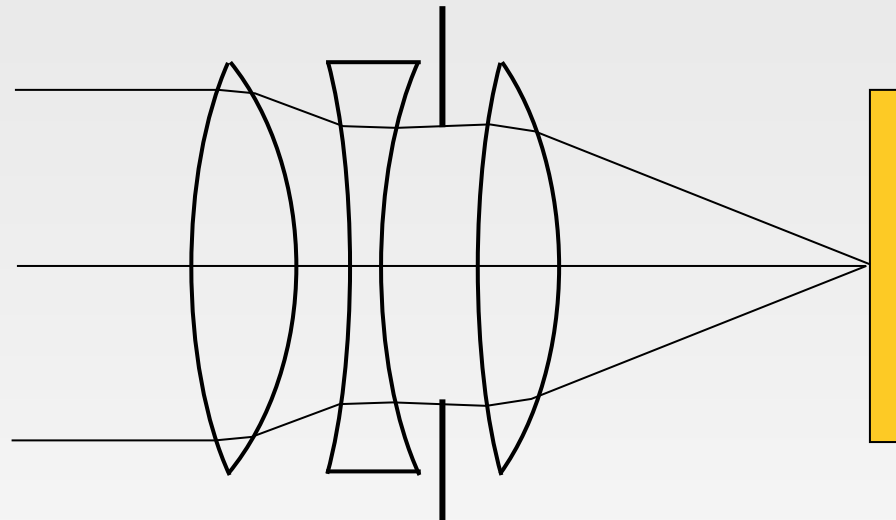


- 光軸に垂直な平面と相似の像が得られること
 - 被写体と像との, **幾何学的な相似**
 - 像が歪んではいけない
 - 像がボケてはいけない
 - **測光学的な相似** (被写体の輝度と画素値との相似)
 - 周辺が中央付近より暗くてはいけない

→ 収差論

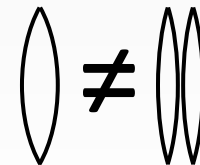


光学系の構成要素



- 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

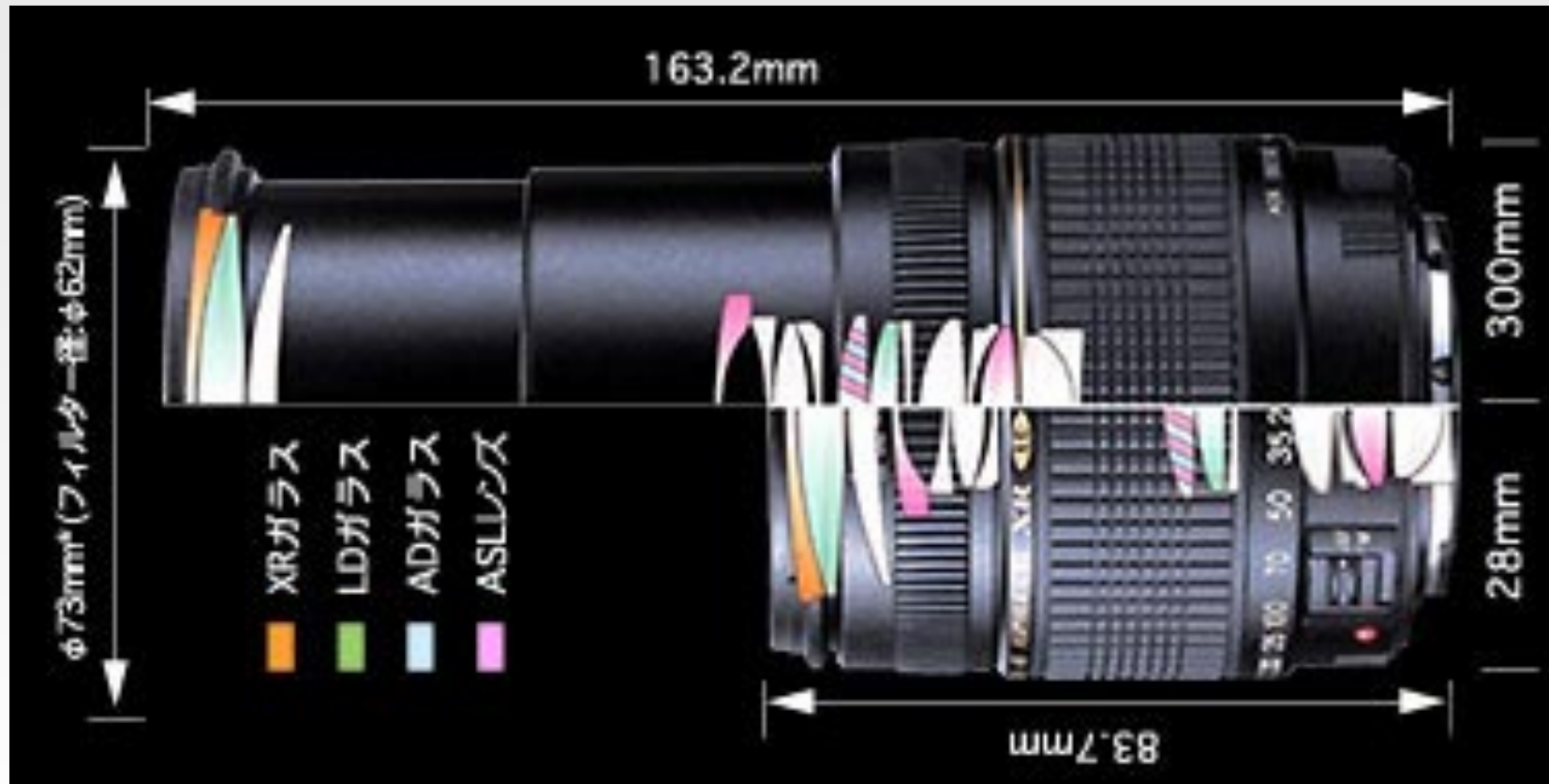


- 絞り

- 光量とボケ量の調節に用いる



レンズの例

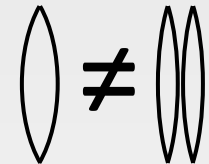


様々な種類, 形状のレンズを組み合わせている

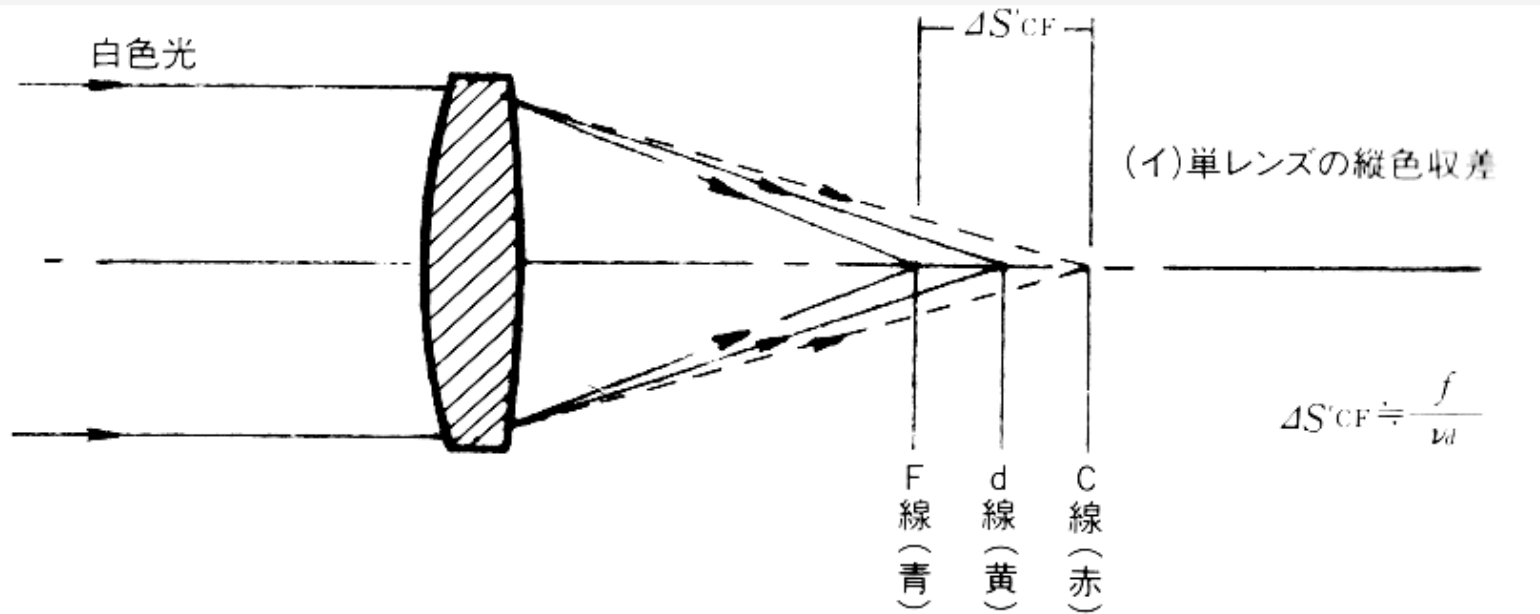
なぜ多くのレンズ、ガラスを 組み合わせるのか

- 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

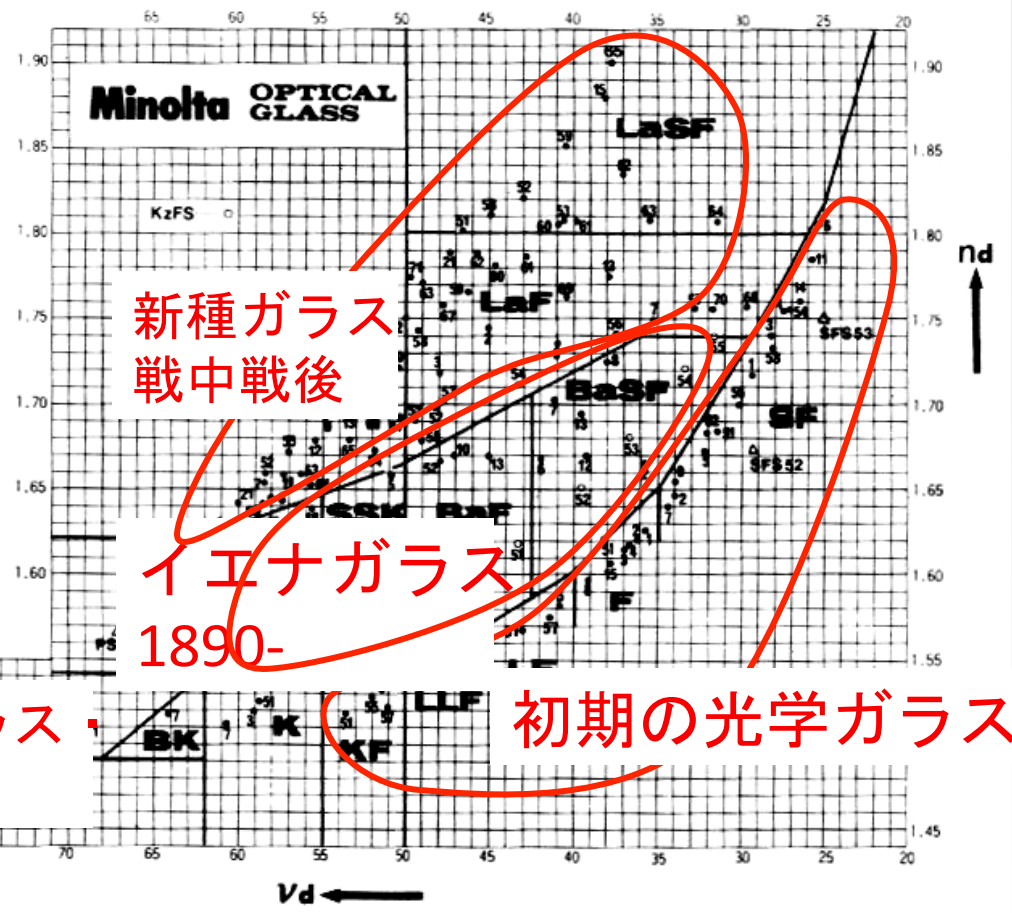
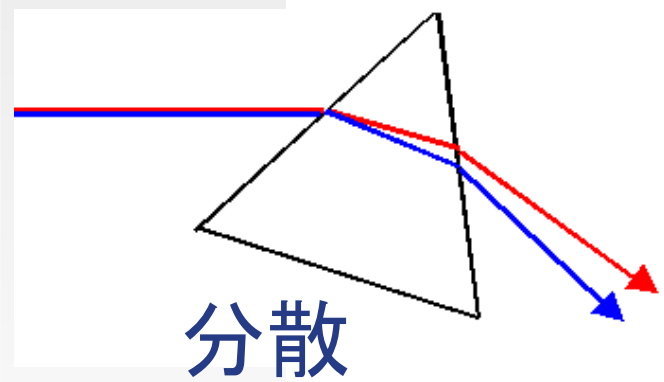




光学ガラスの定数



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

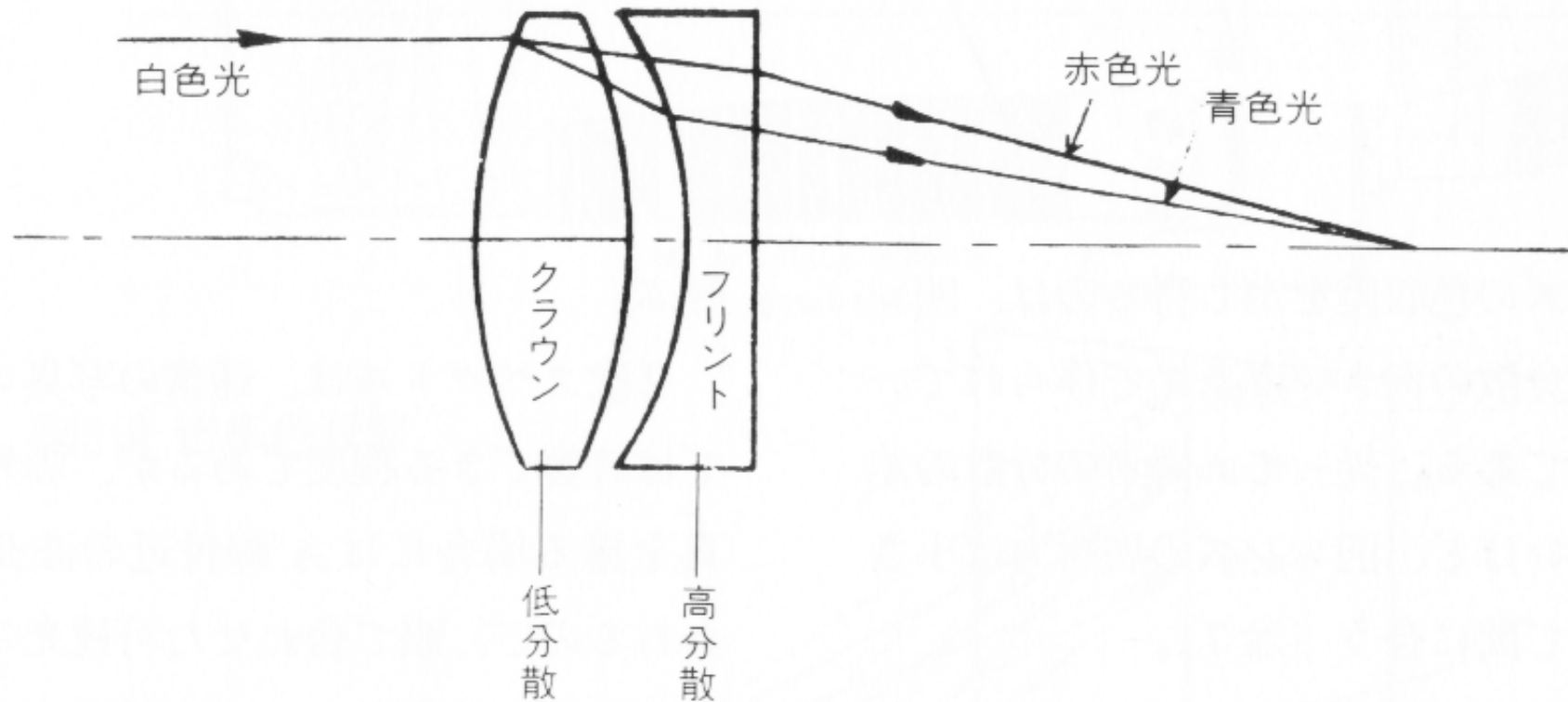
イェナガラス
1890-

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)

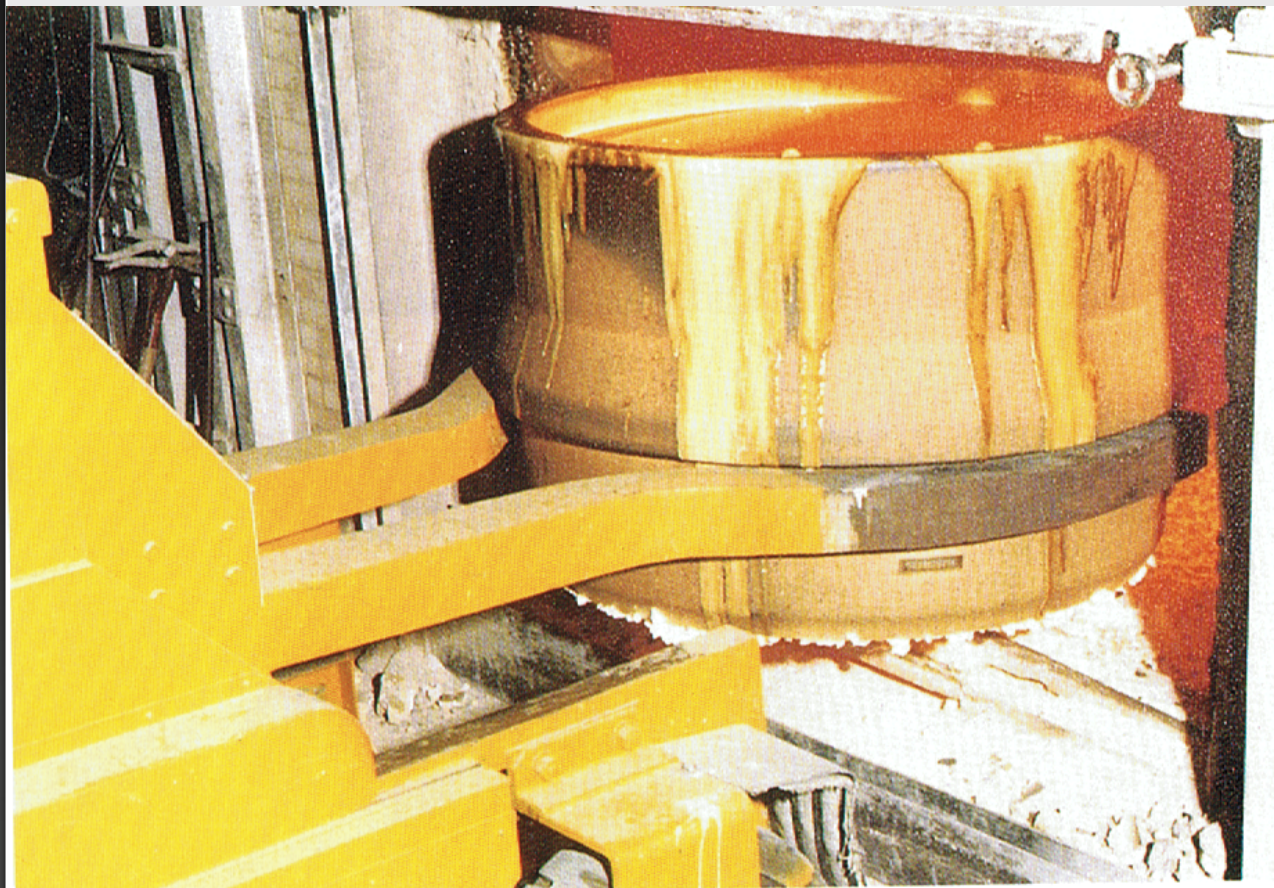


①粘土ルツボの製作

- 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)



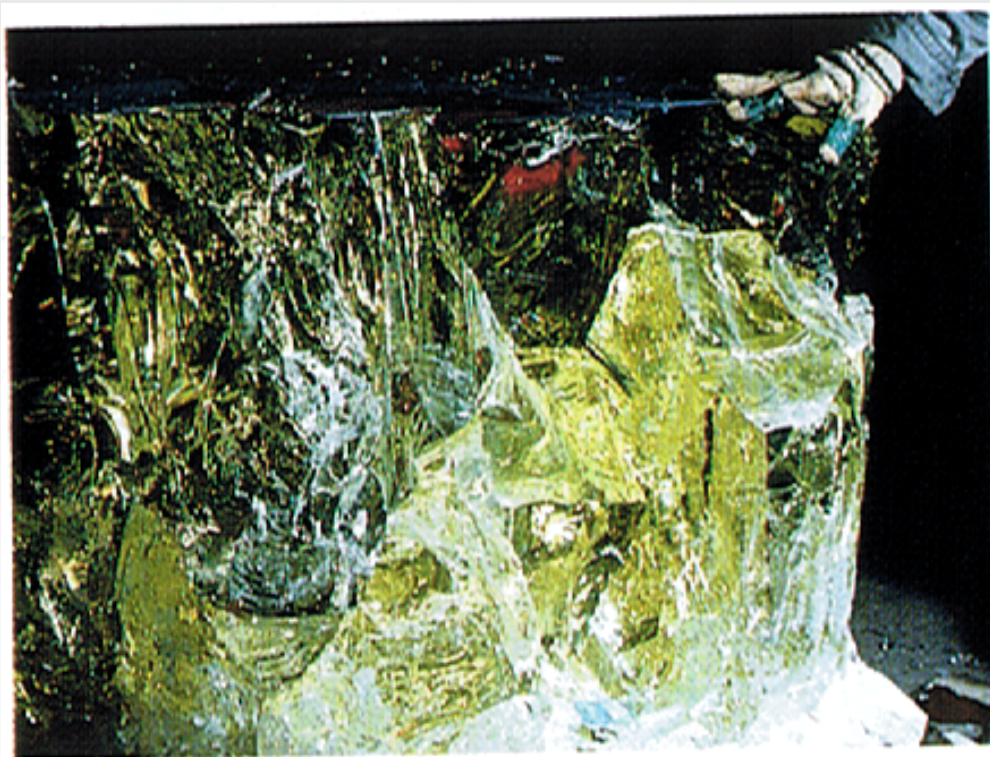
②粘+ルツボごと取り出された溶融ガラス

- 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

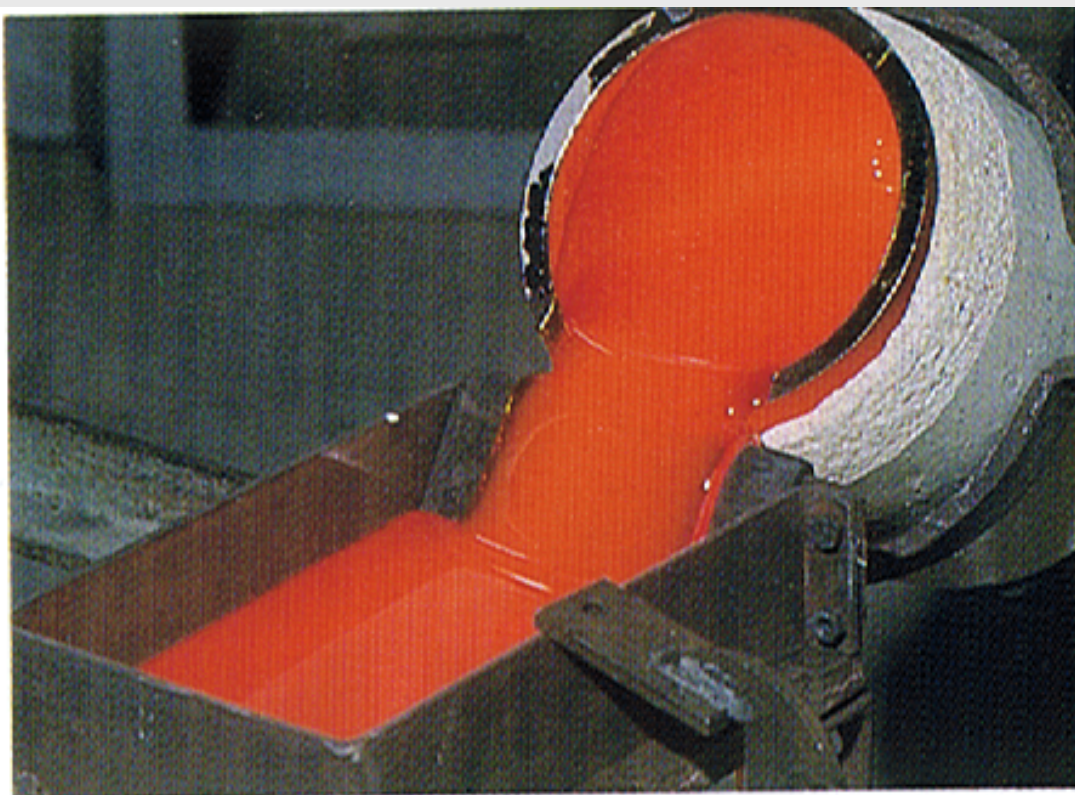
- ルツボを割ってガラスを取り出す
 - ガラスも同時に割れるが，不均一部分（脈理，泡）が除きやすい．良品率 50% 程度

○ 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)



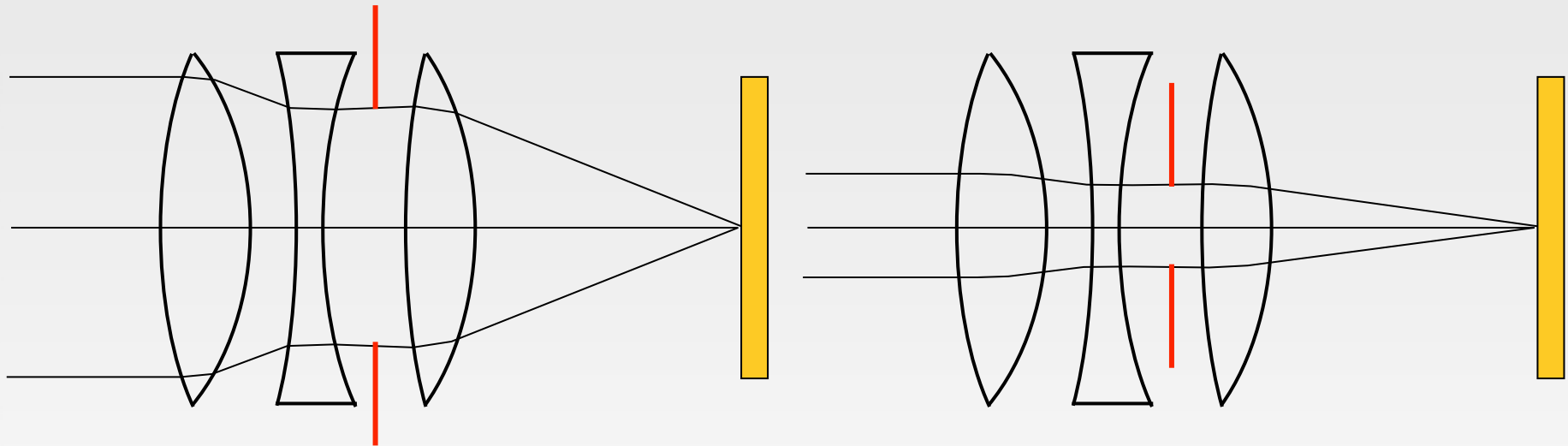
④白金ルツボによる溶融

- ガラスの特性
 - 屈折率 ± 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



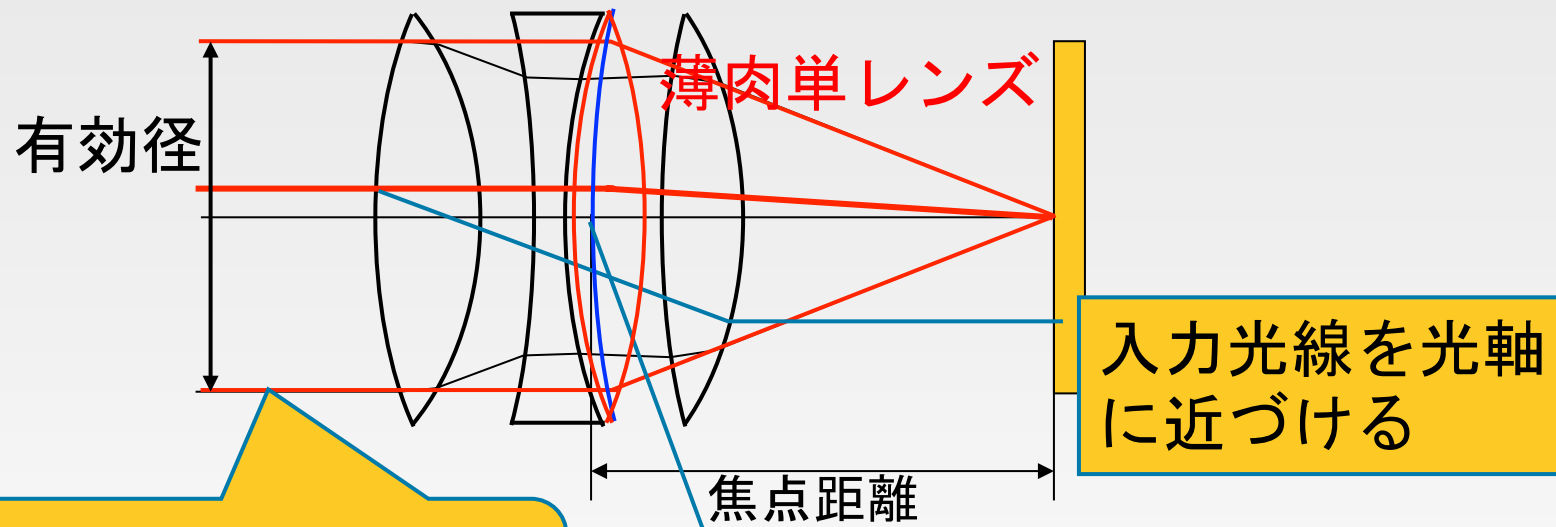
焦点距離



- 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



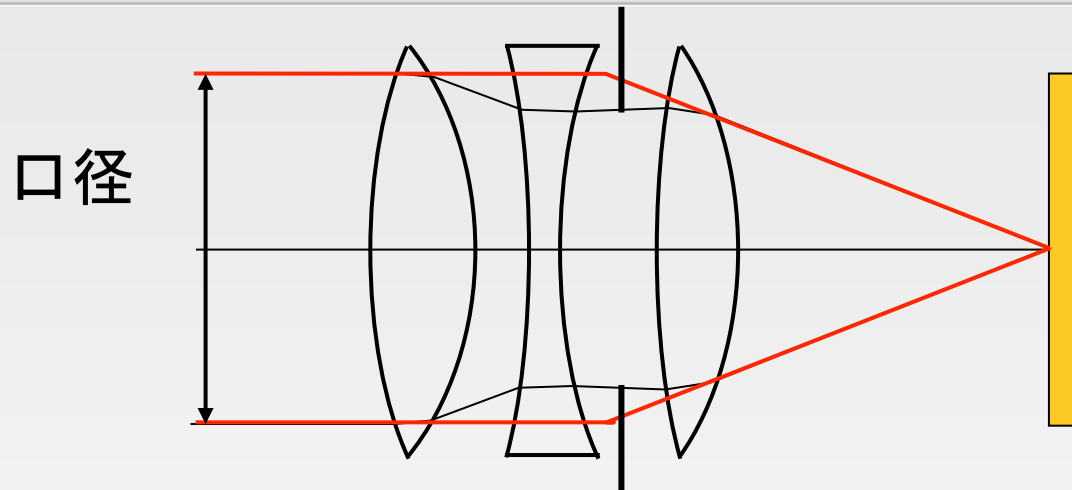
入力光線と出力光線を延長して交点を求める

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

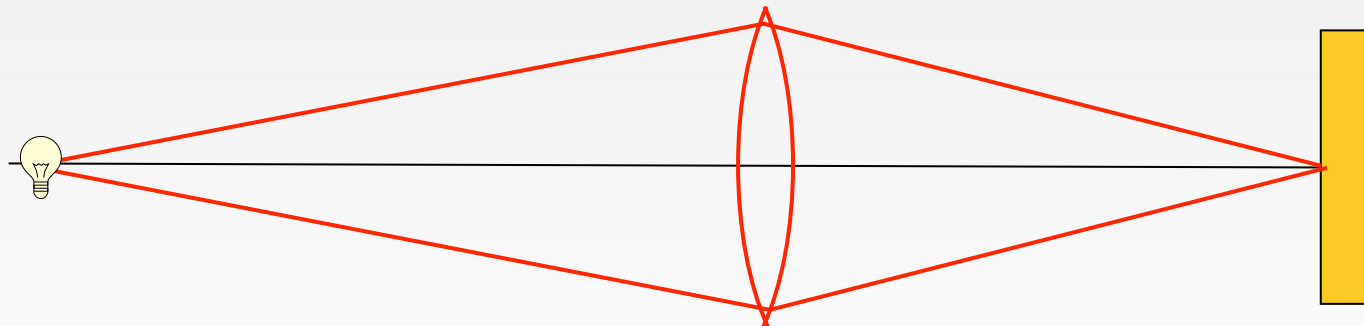
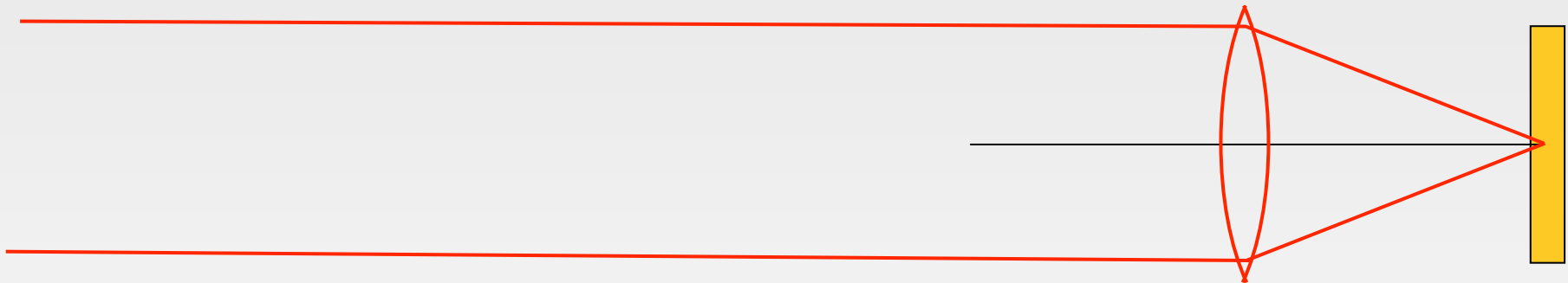
- 昔のカメラのうち一部は、露出計を簡略化するために絞りとシャッター速度を同軸に並べていた



ピントが合うとは



無限遠にピントが合った状態

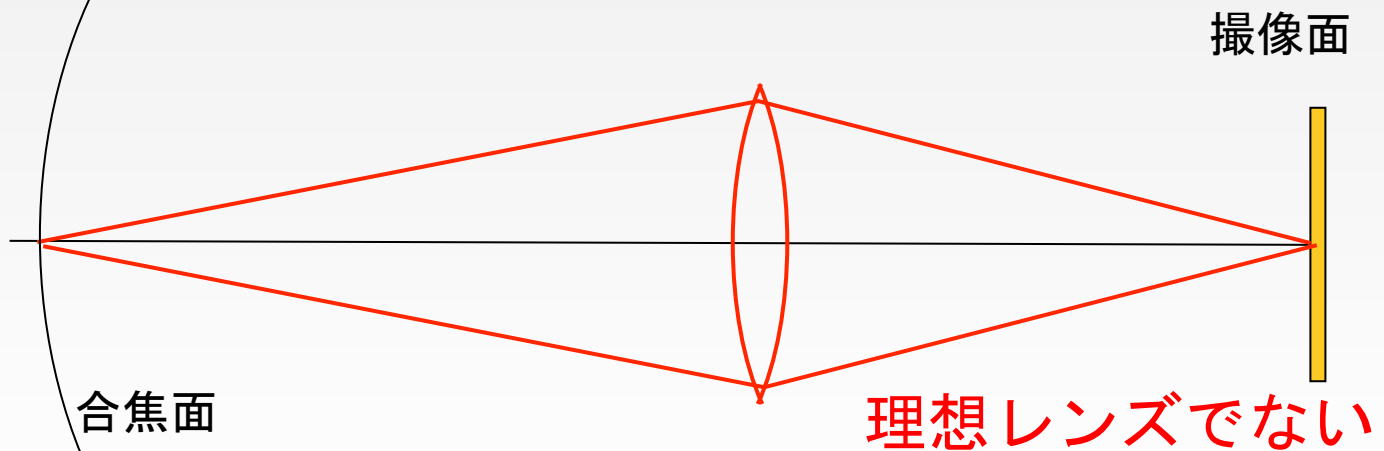
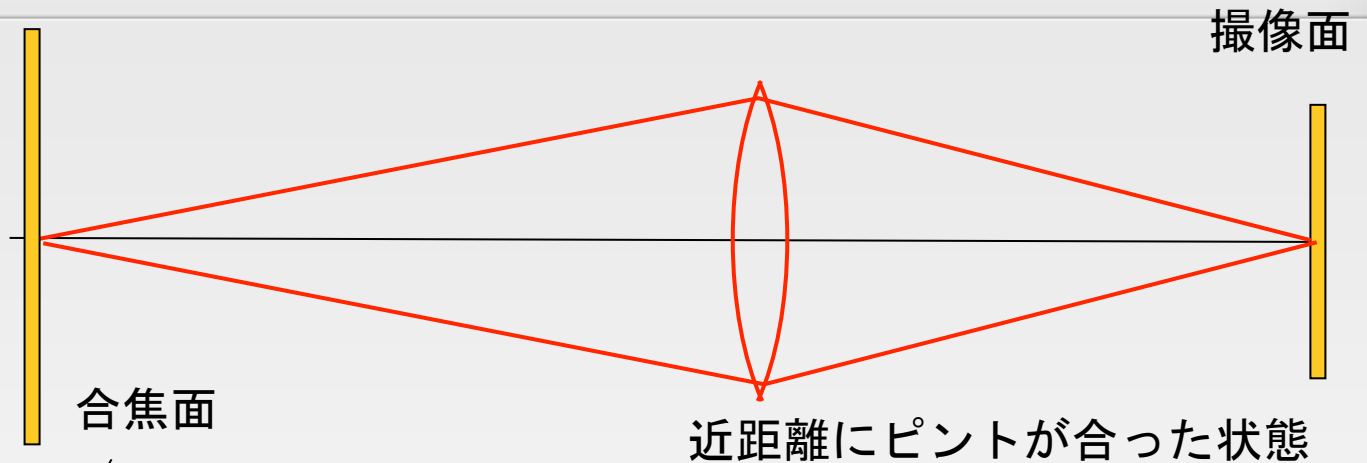


近距離にピントが合った状態

- 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



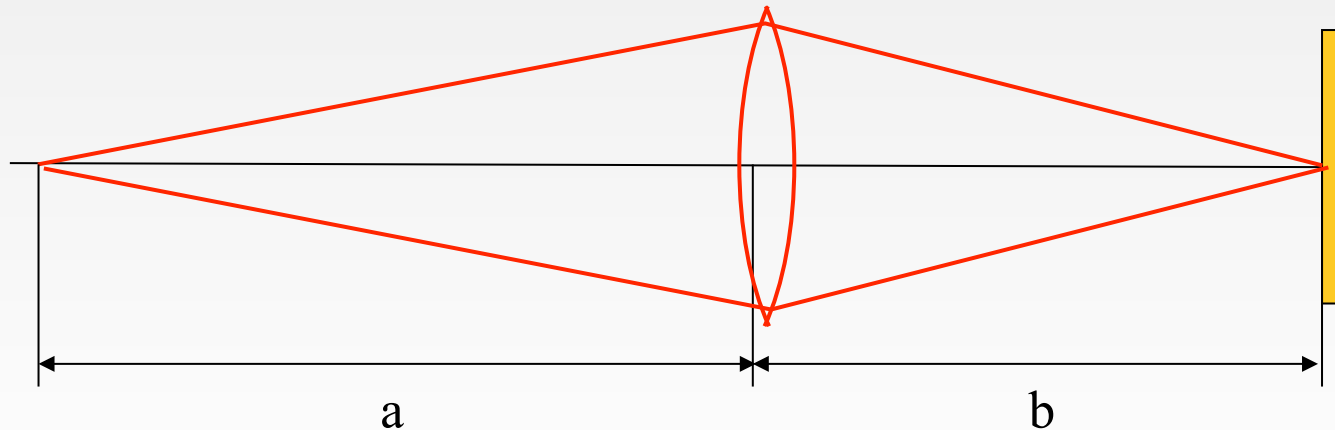
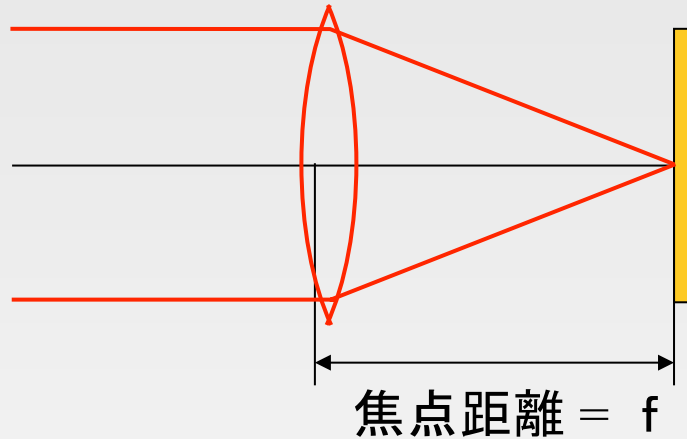
- 撮像面が平面なら合焦面も平面（理想レンズの場合）



結像公式(1)



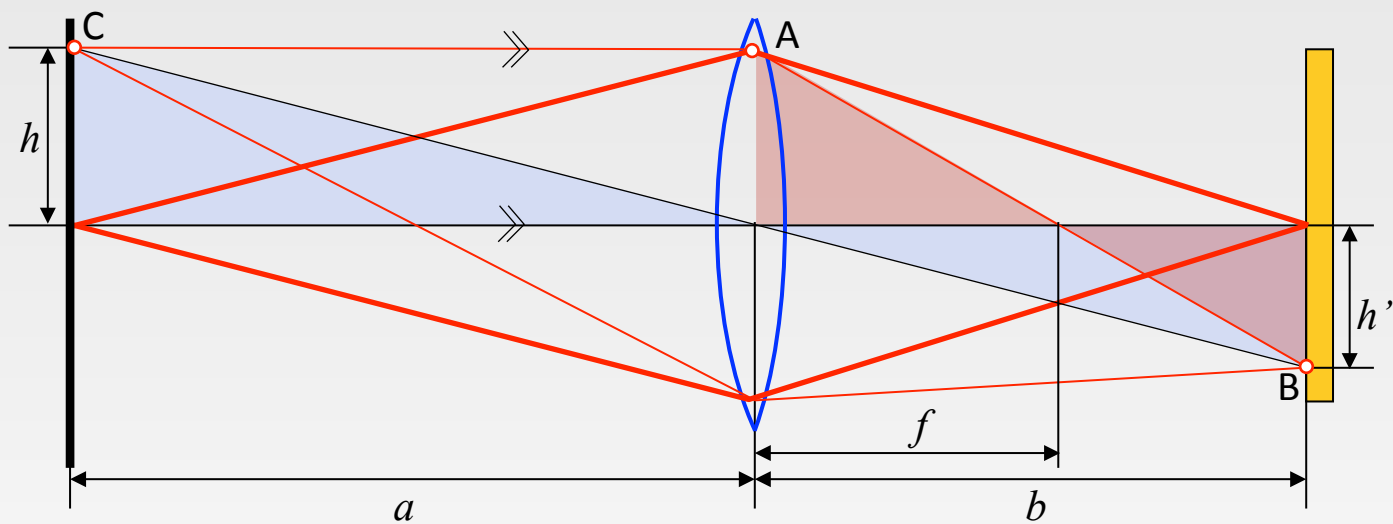
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$$



- 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.

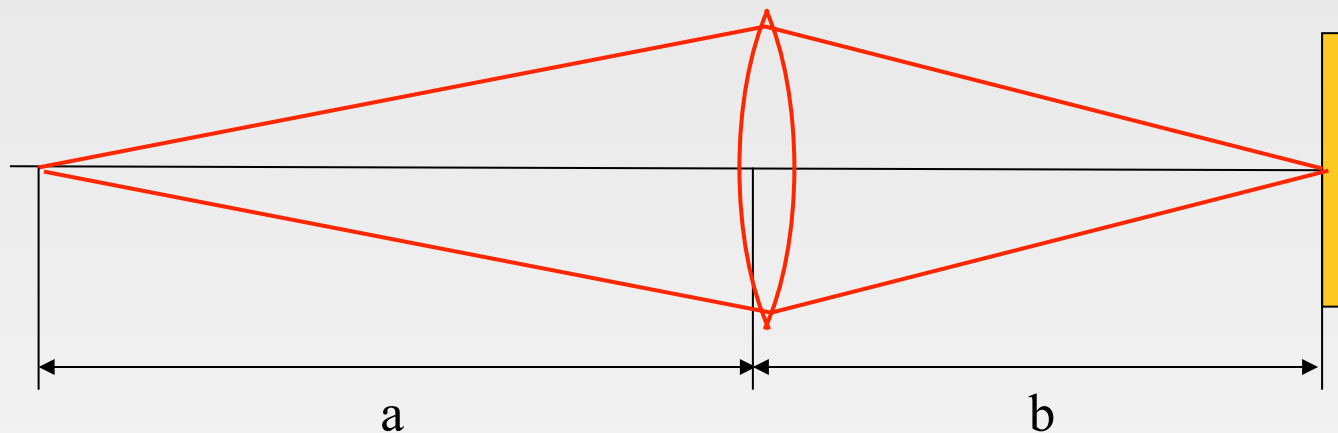
$\frac{a}{fb} = \frac{1}{b-f}$ これを整理すると $\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$ が得られる.



結像公式から分かること



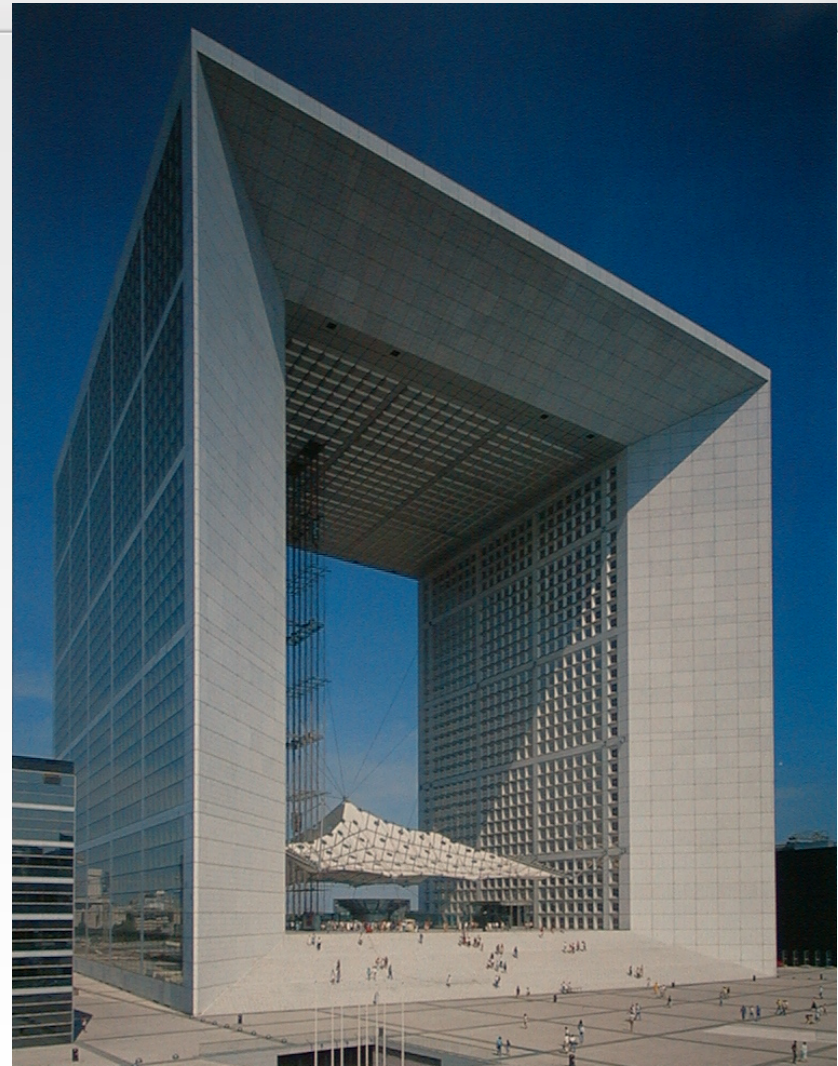
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$$



- $b = f$ 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）



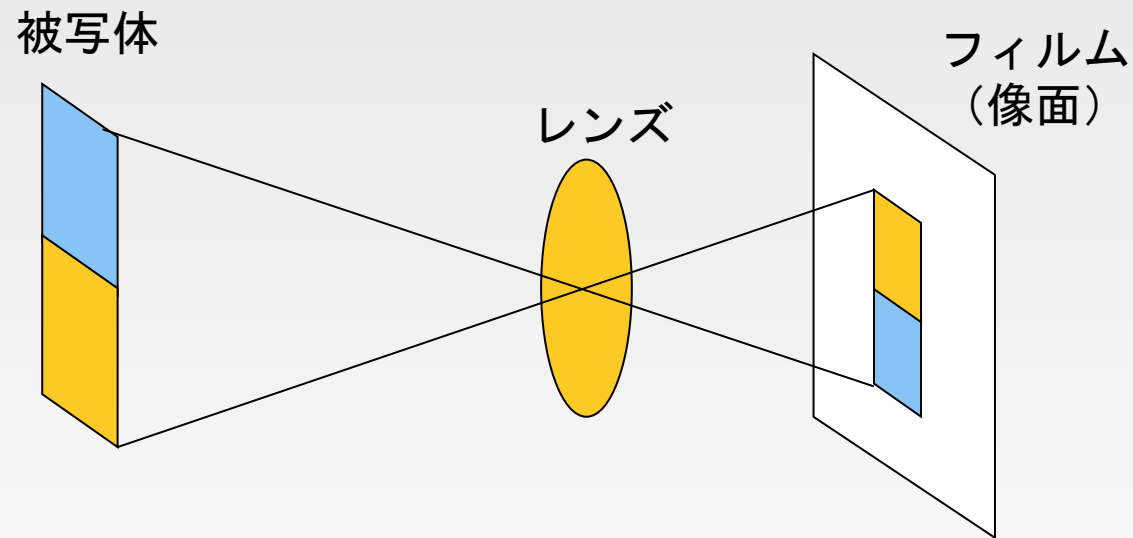
補正前



補正後



アオリ（シフト）撮影の原理（1）



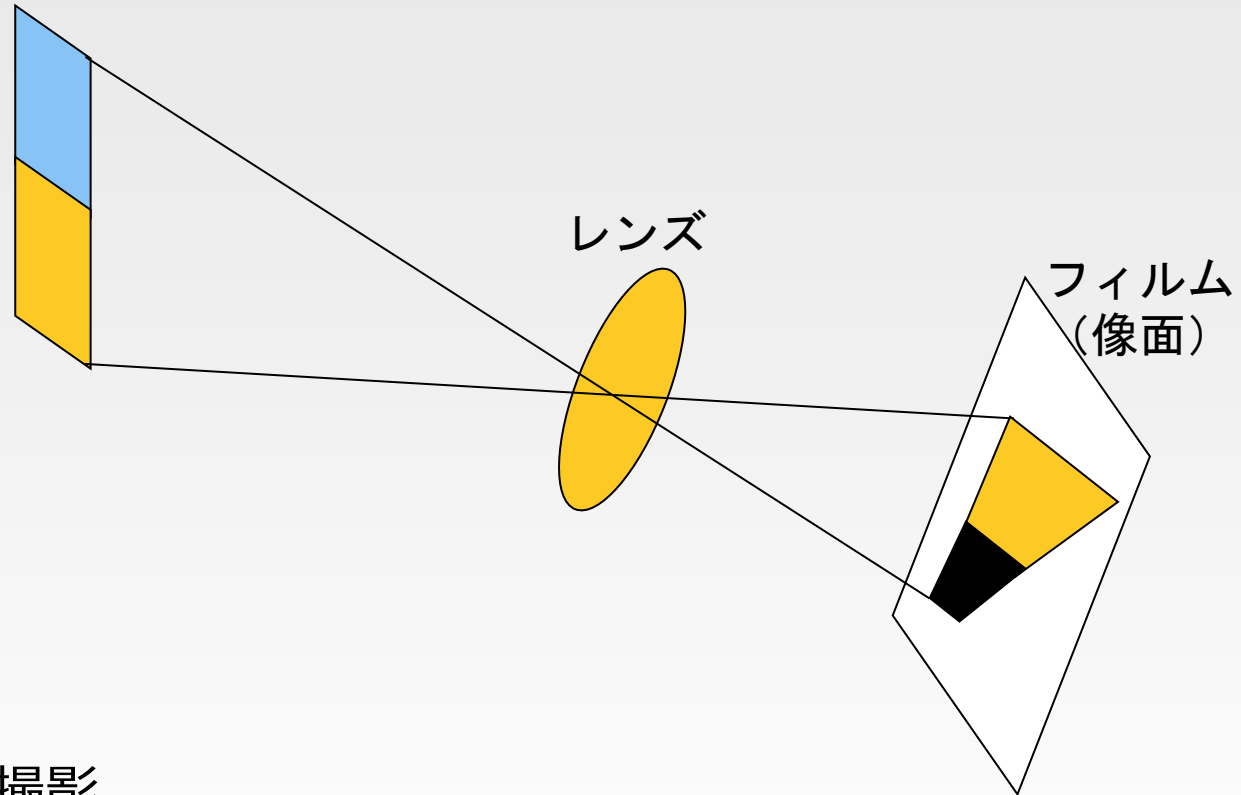
- 通常撮影
被写体とフィルム面が平行である場合、被写体と相似な図形が撮影される



アオリ（シフト）撮影の原理（2）



被写体



- 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）



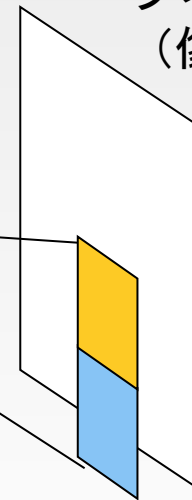
被写体



レンズ



フィルム
(像面)



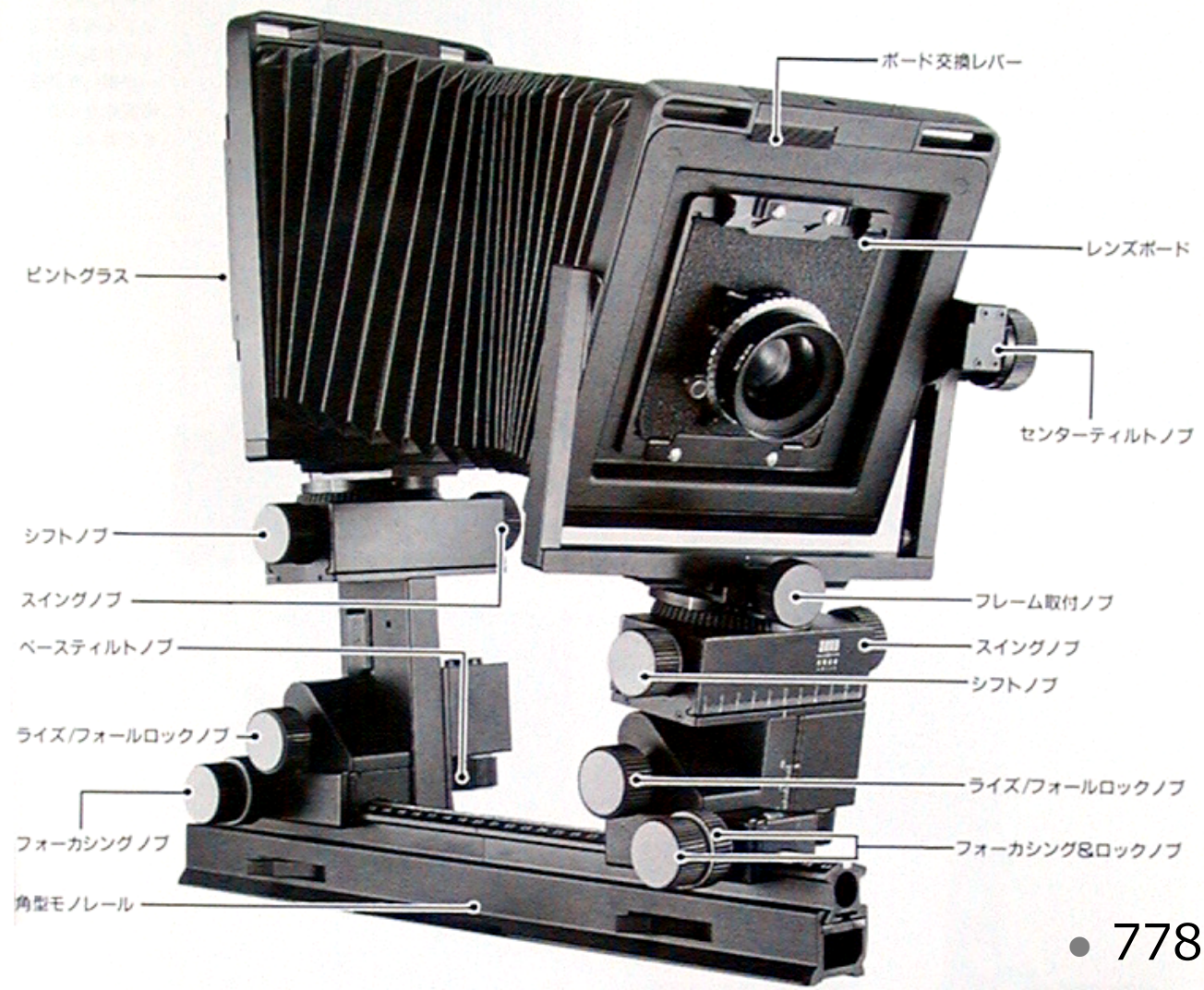
- アオリ撮影
フィルム面と被写体の平行を保ったまま，フィルム面を面内平行移動する



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



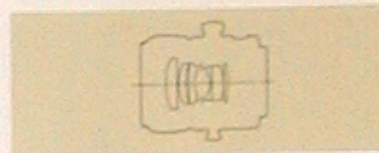
TS-E24mm F3.5L



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

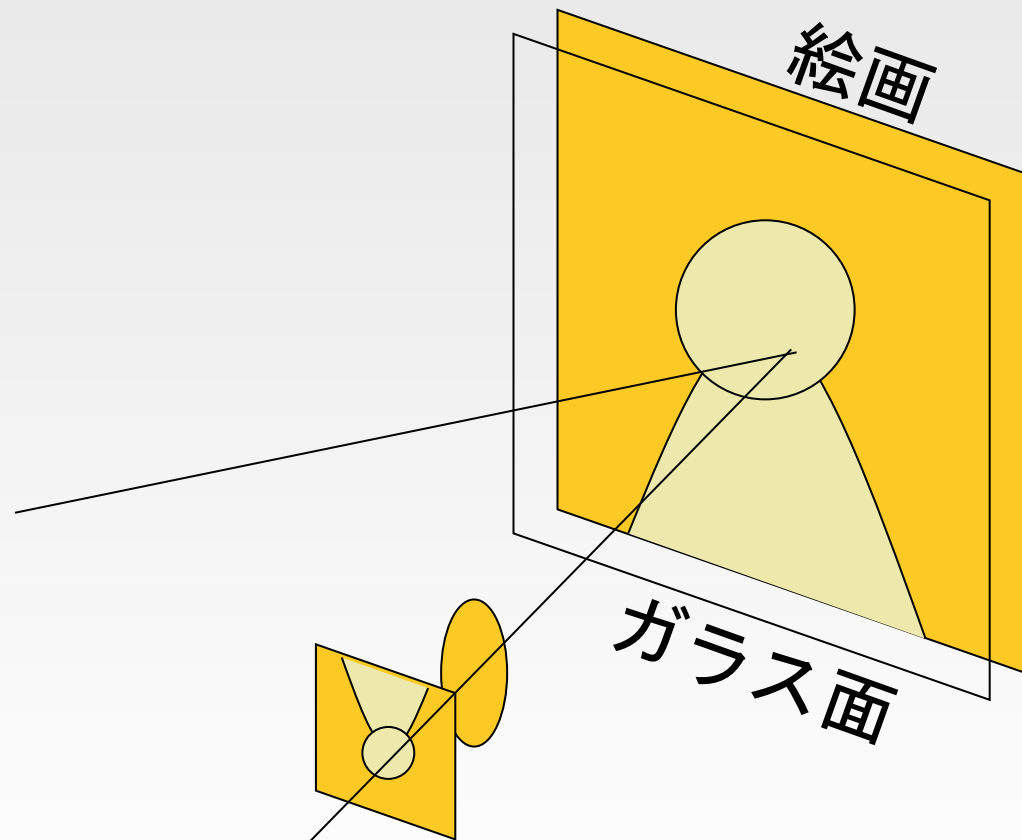


2-D homography 変形





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



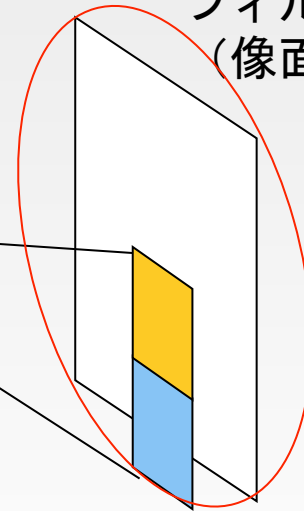
被写体



レンズ



フィルム
(像面)



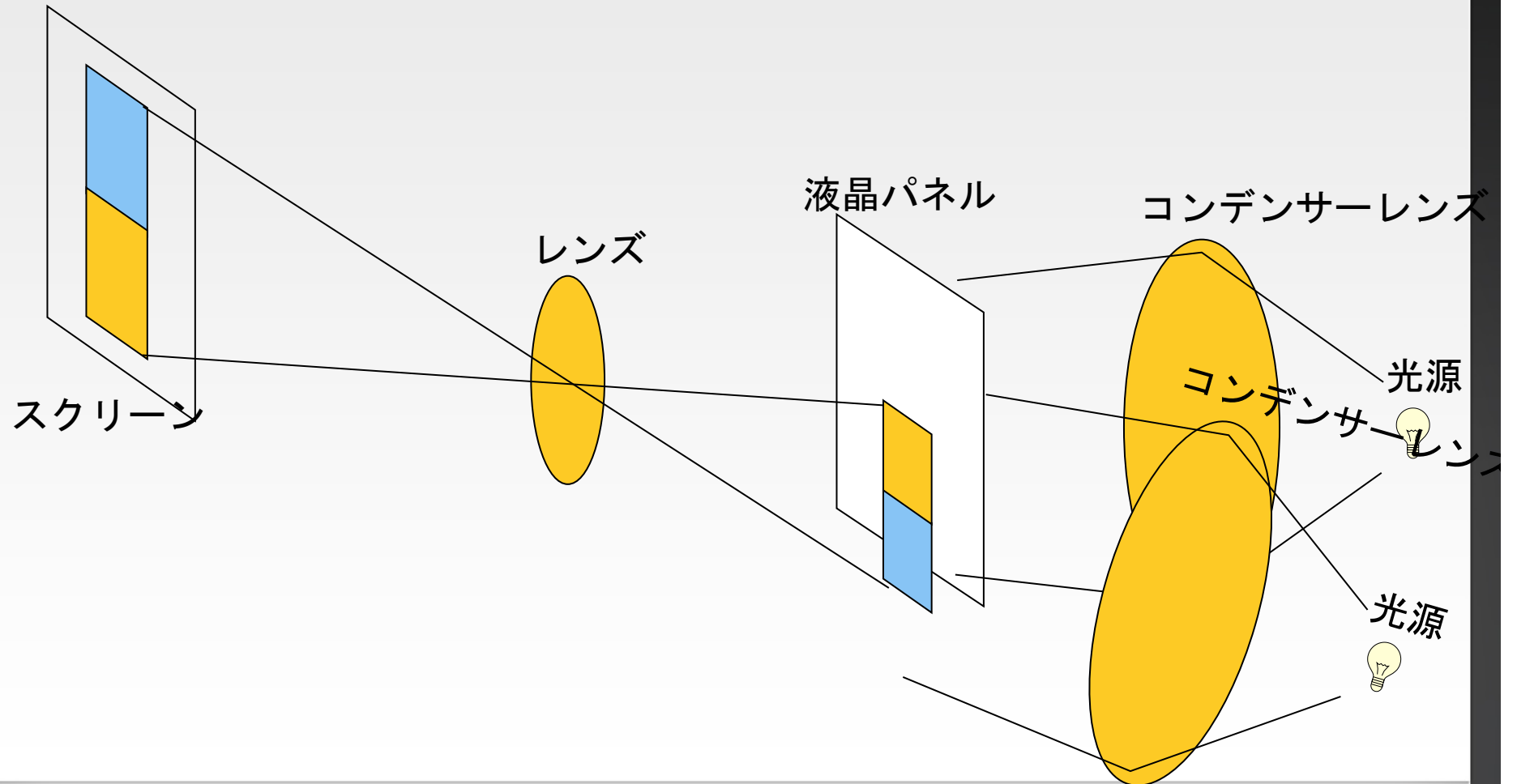
- レンズが画像を形成できる直径には限界がある



シフトの実例



- 液晶プロジェクタ

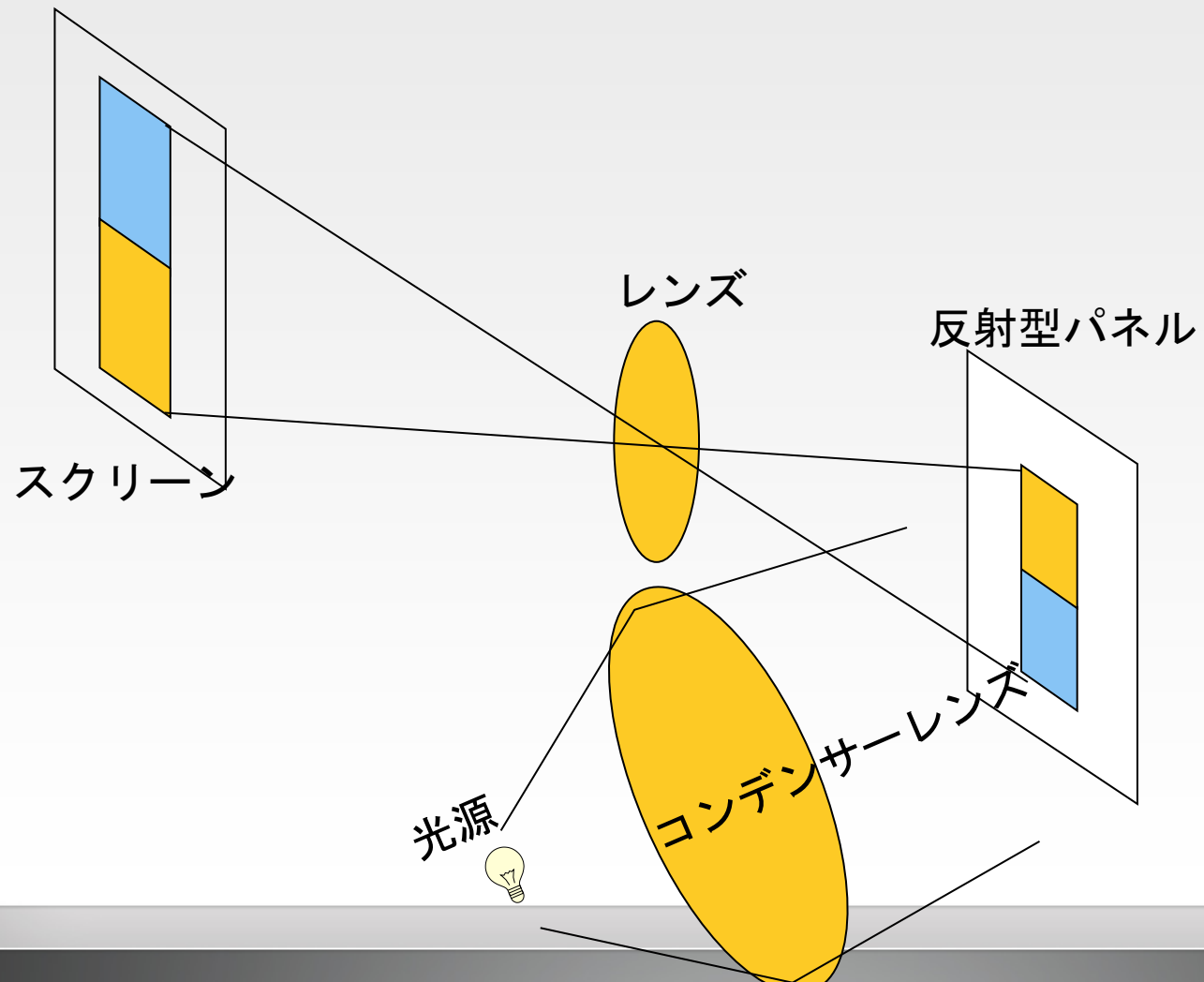




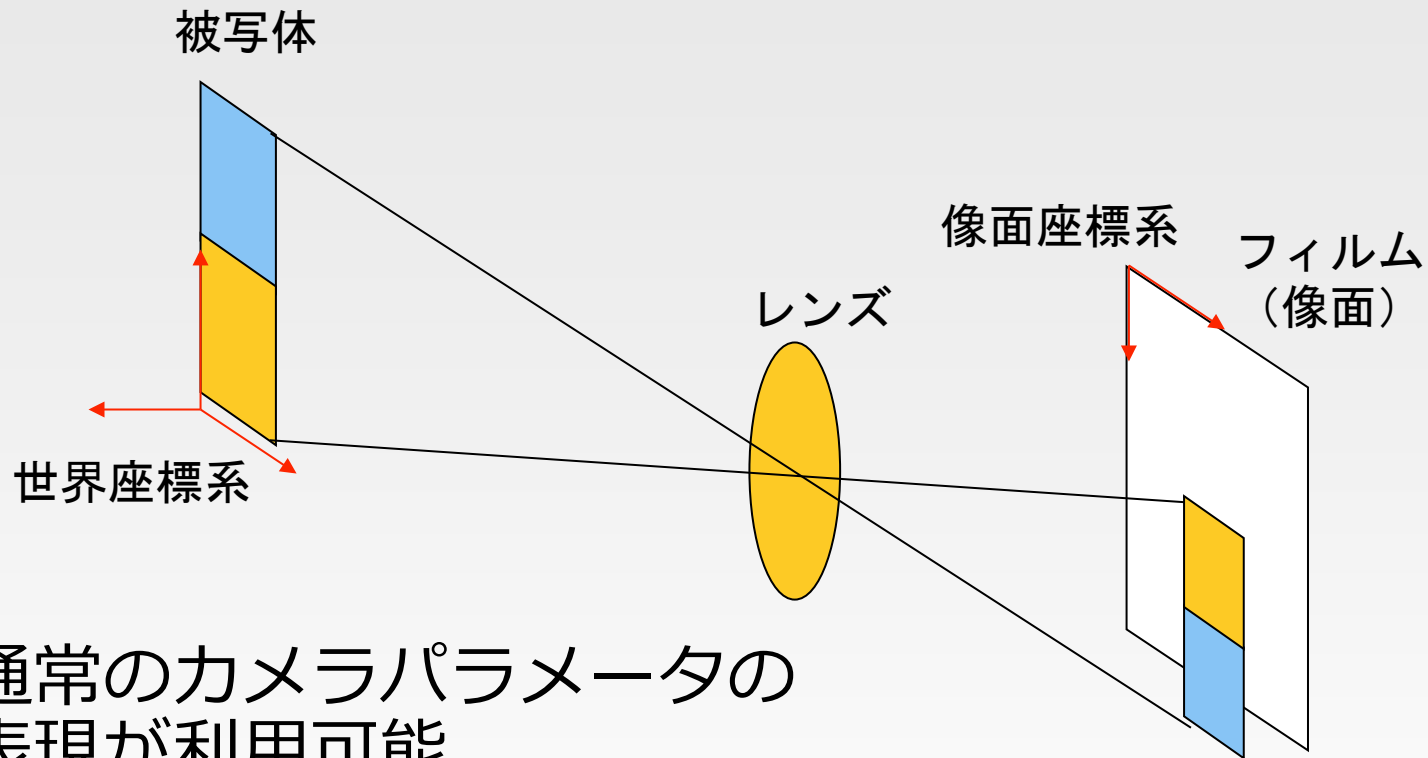
シフトの実例



- 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

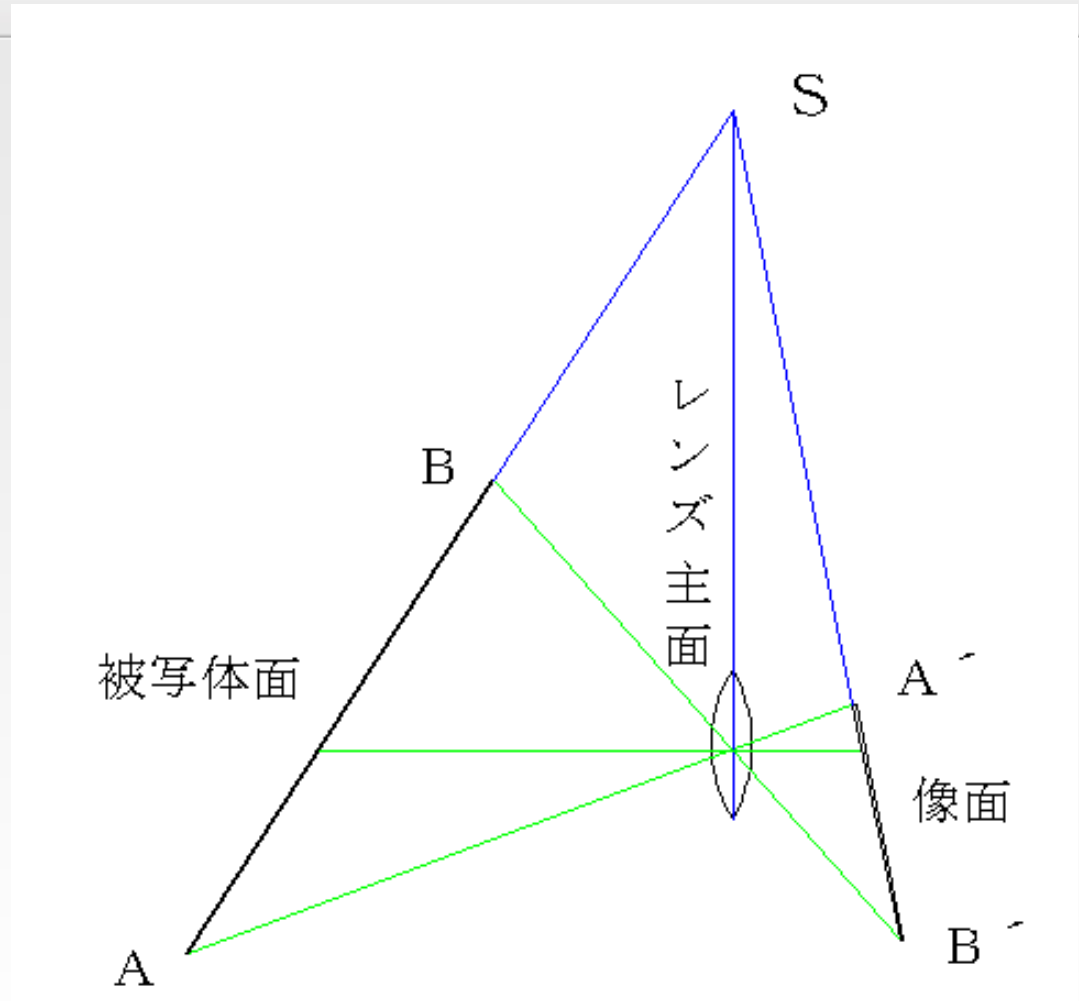


- 通常のカメラパラメータの表現が利用可能
- 像面座標系上での平行移動が加わるだけ

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



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

テイルト撮影の例（1）



- 船の模型全体にピントが合っている



わざとぼかす



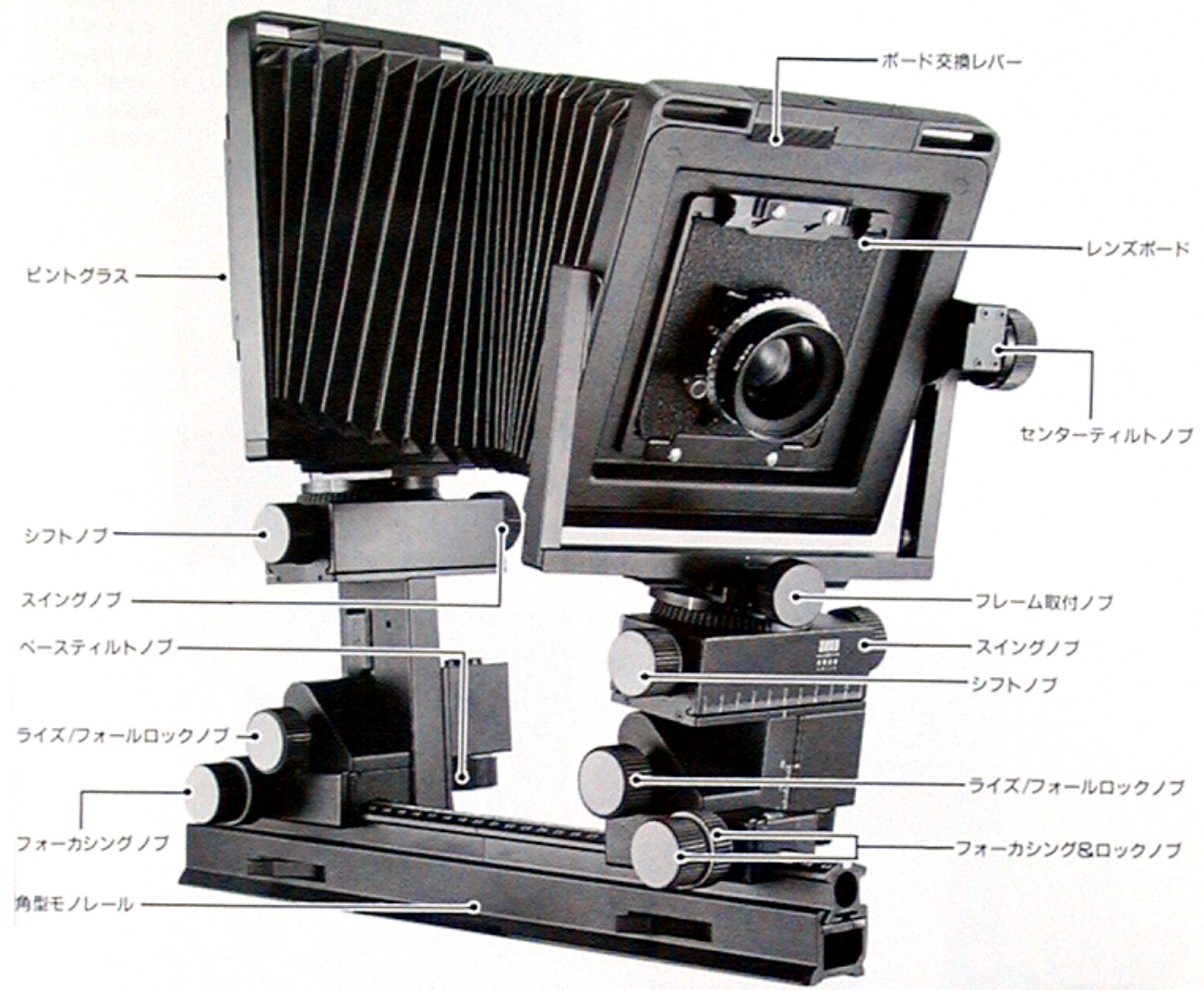
- 本城直季, "small planet" など. ミニチュア効果として最近流行



撮影機材：ビューカメラ



◆アルカスイスMライン 4×5





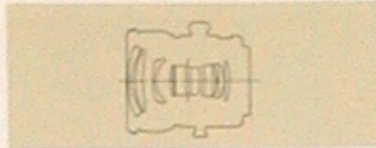
35mm 一眼レフ用シフトレンズ



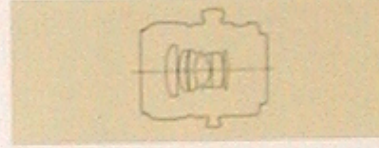
TS-E24mm F3.5L



TS-E45mm F2.8



TS-E90mm F2.8



キヤノン



ニコン



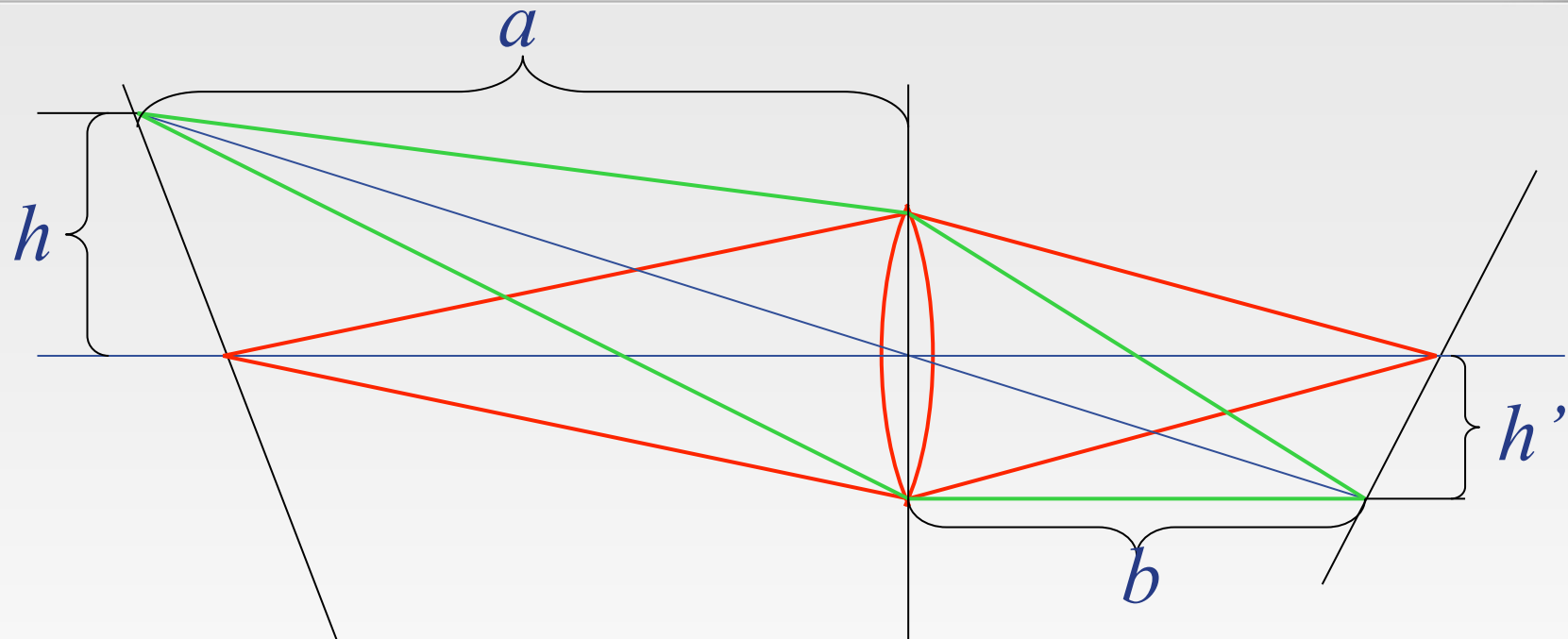
攝影機材：內藏型



- 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, α, 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)

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

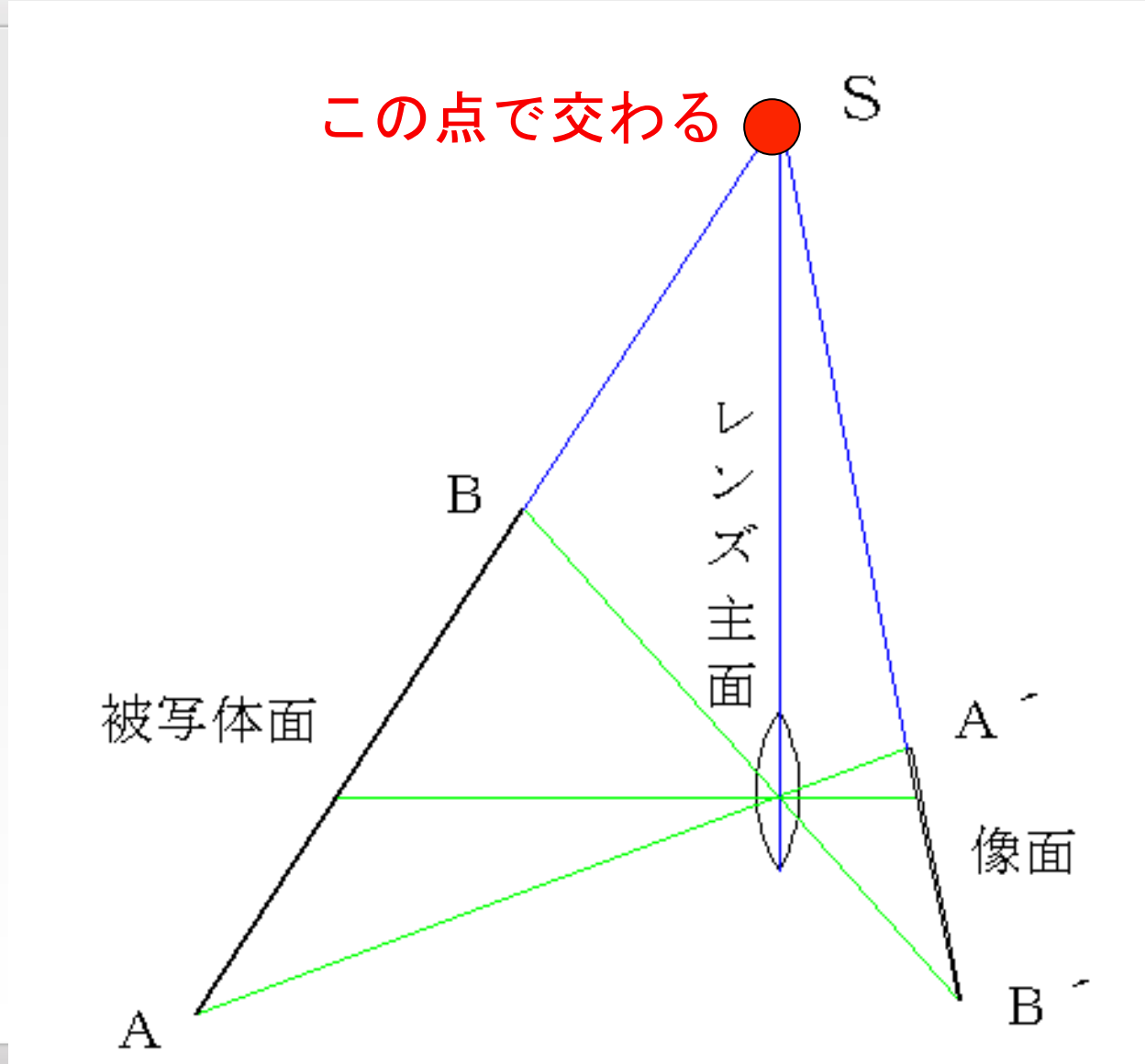
一方, 像の式 $a = \alpha h + a_0$ で $a=0$ なら (像とレンズ面の交わり)

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

つまりこれらは1点で交わる.

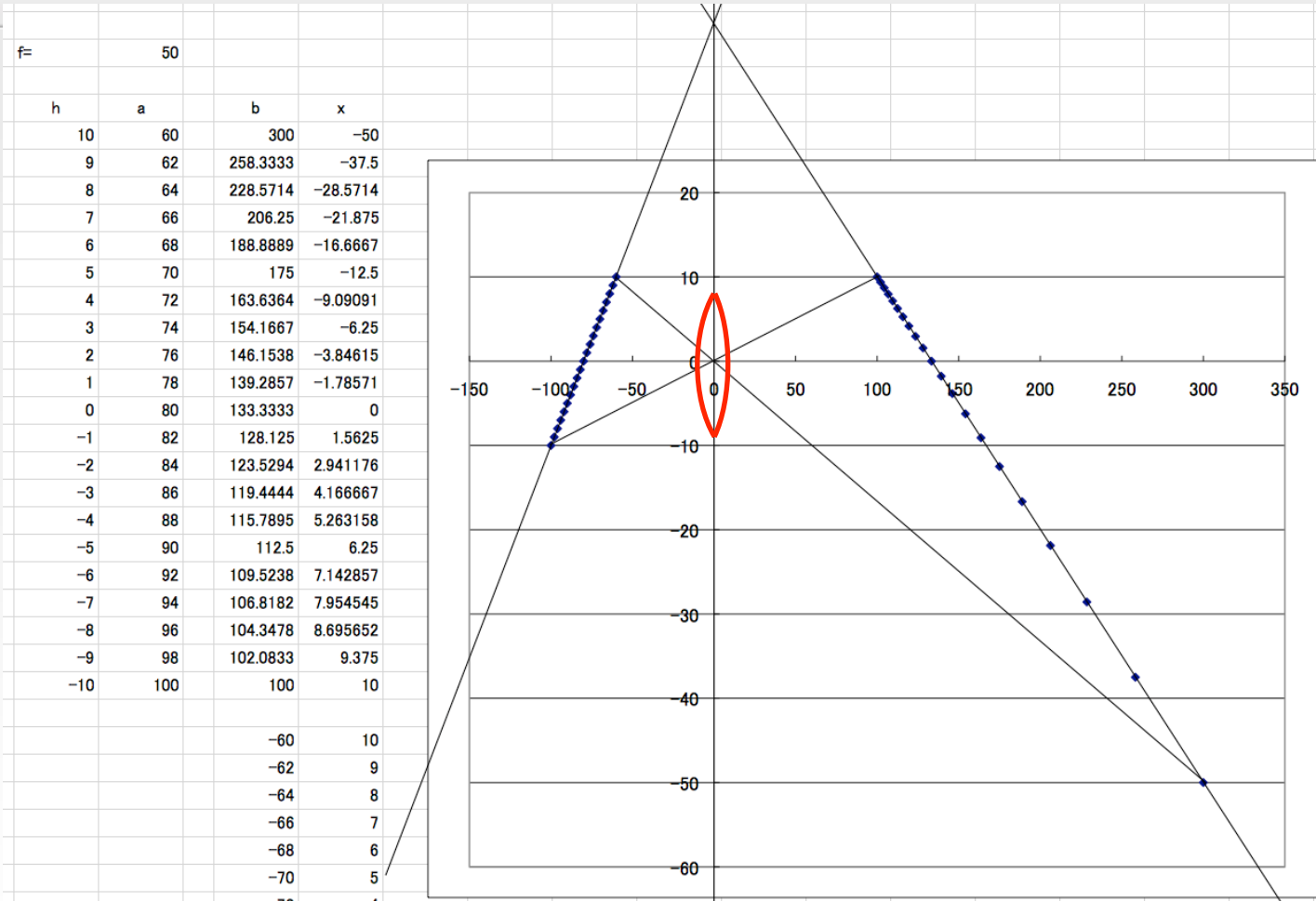


シャインフリュークの法則





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

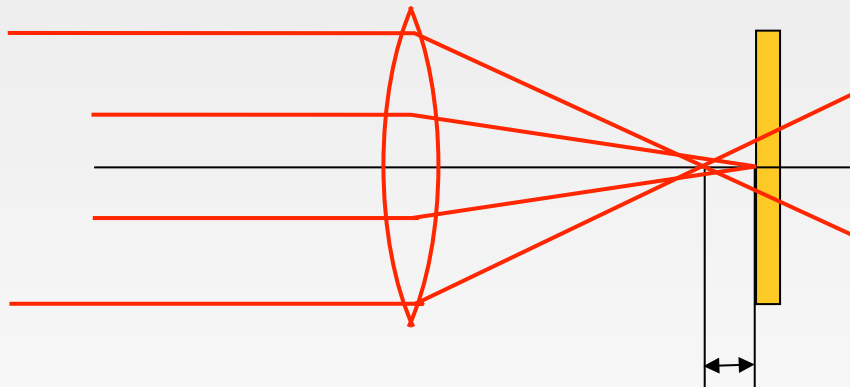
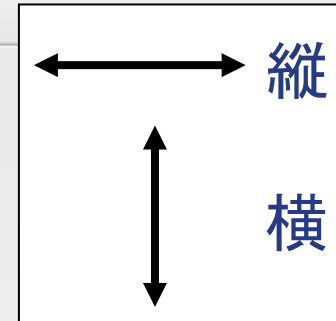


ザイデルの5収差

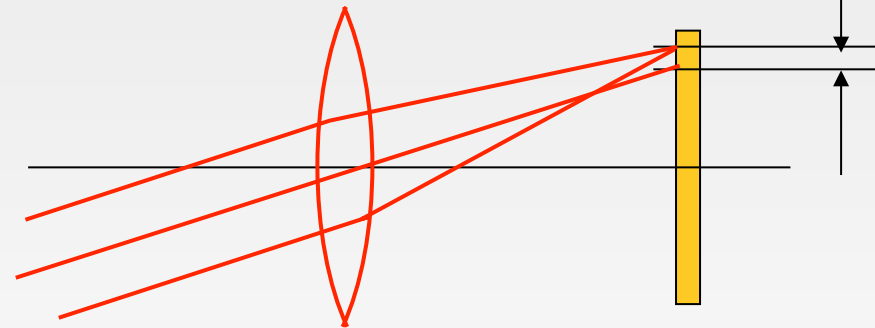
- 入射光が1点に集まらない
 - 球面収差
 - コマ収差
- 像が平面にならない
 - 非点収差
 - 像面湾曲
- 像が歪む
 - 歪曲収差



縦収差と横収差



縦収差（軸上収差）
例：球面収差



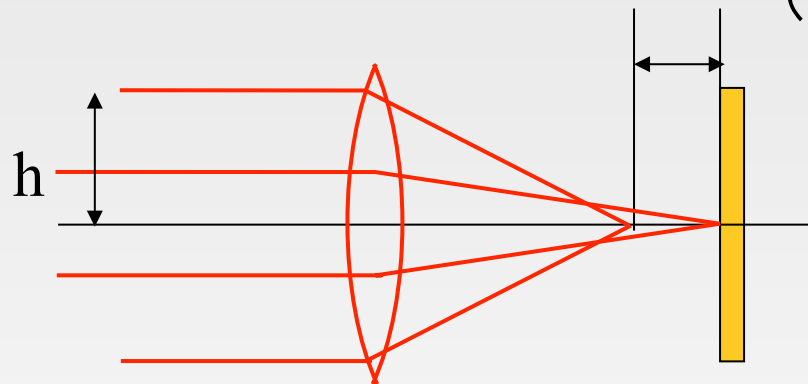
横収差
例：コマ収差

- 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)



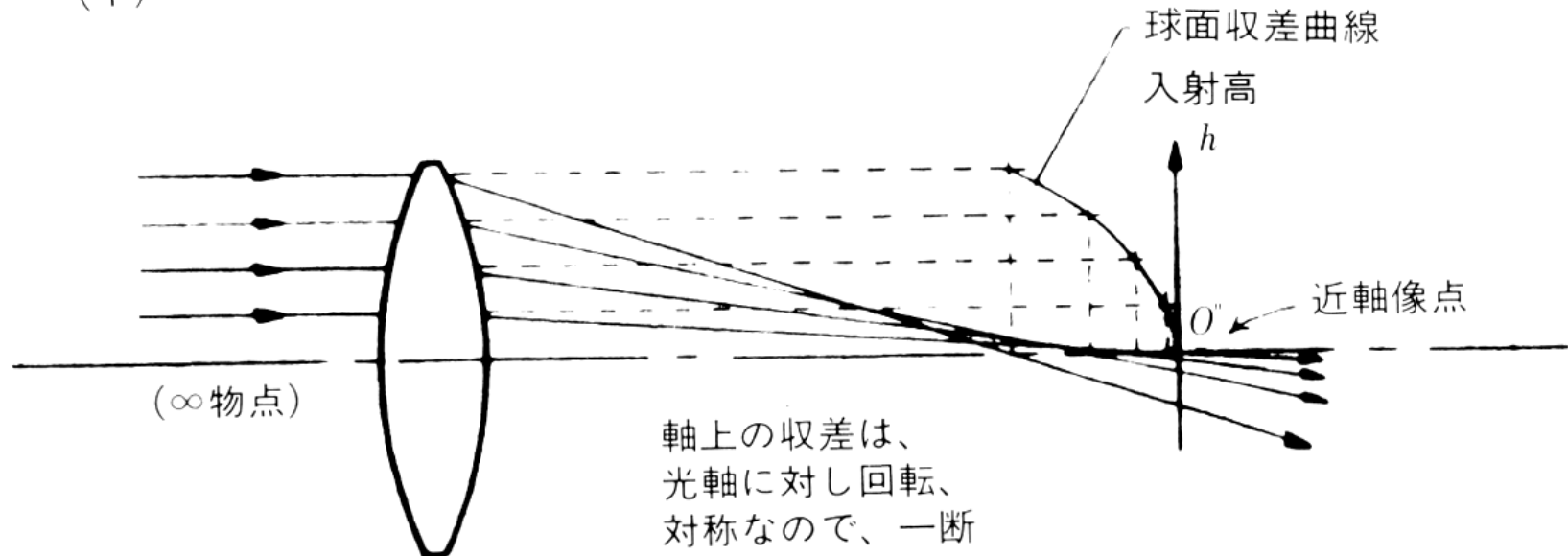
入射高 h に起因する縦収差

- 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)



(∞ 物点)

球面収差曲線

入射高

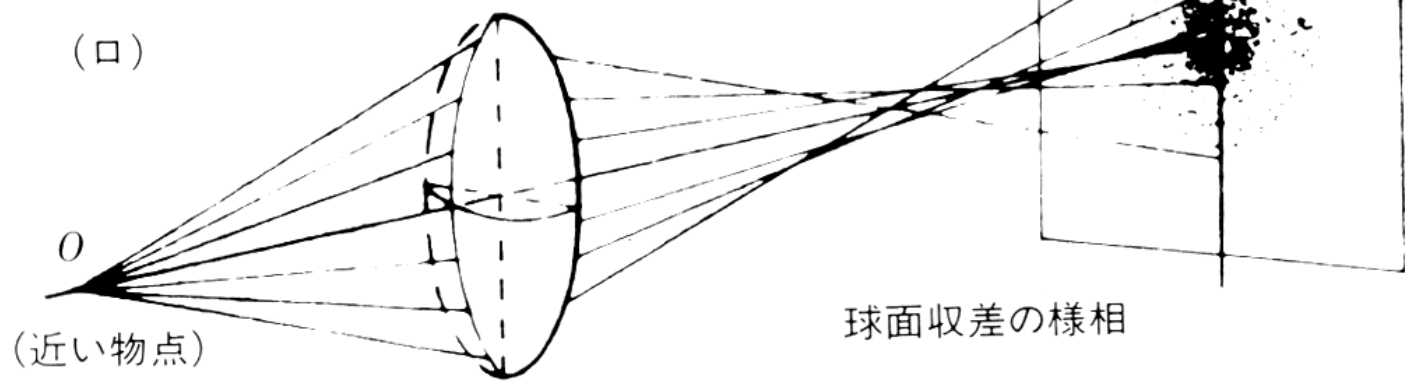
h

近軸像点

O''

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)

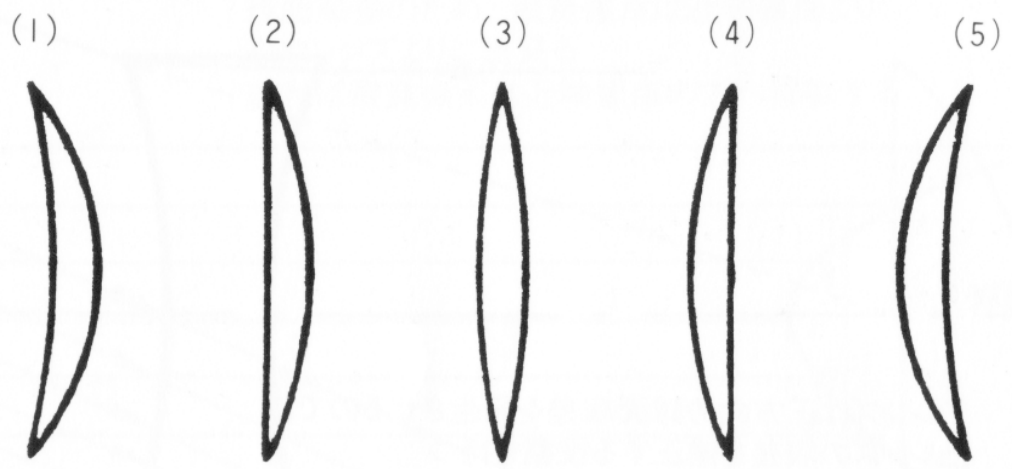


(近い物点)

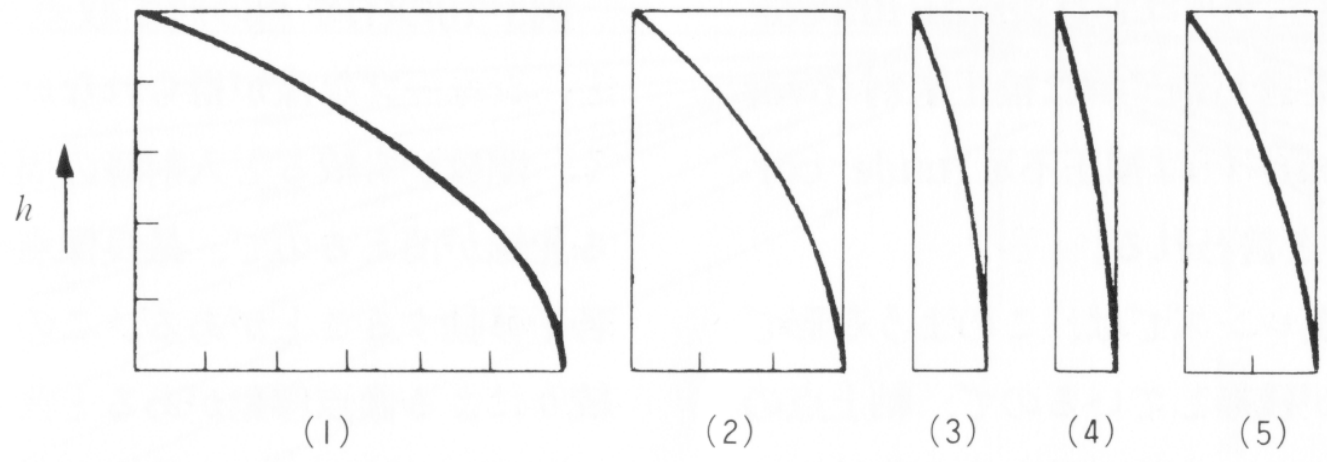
球面収差の様相



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



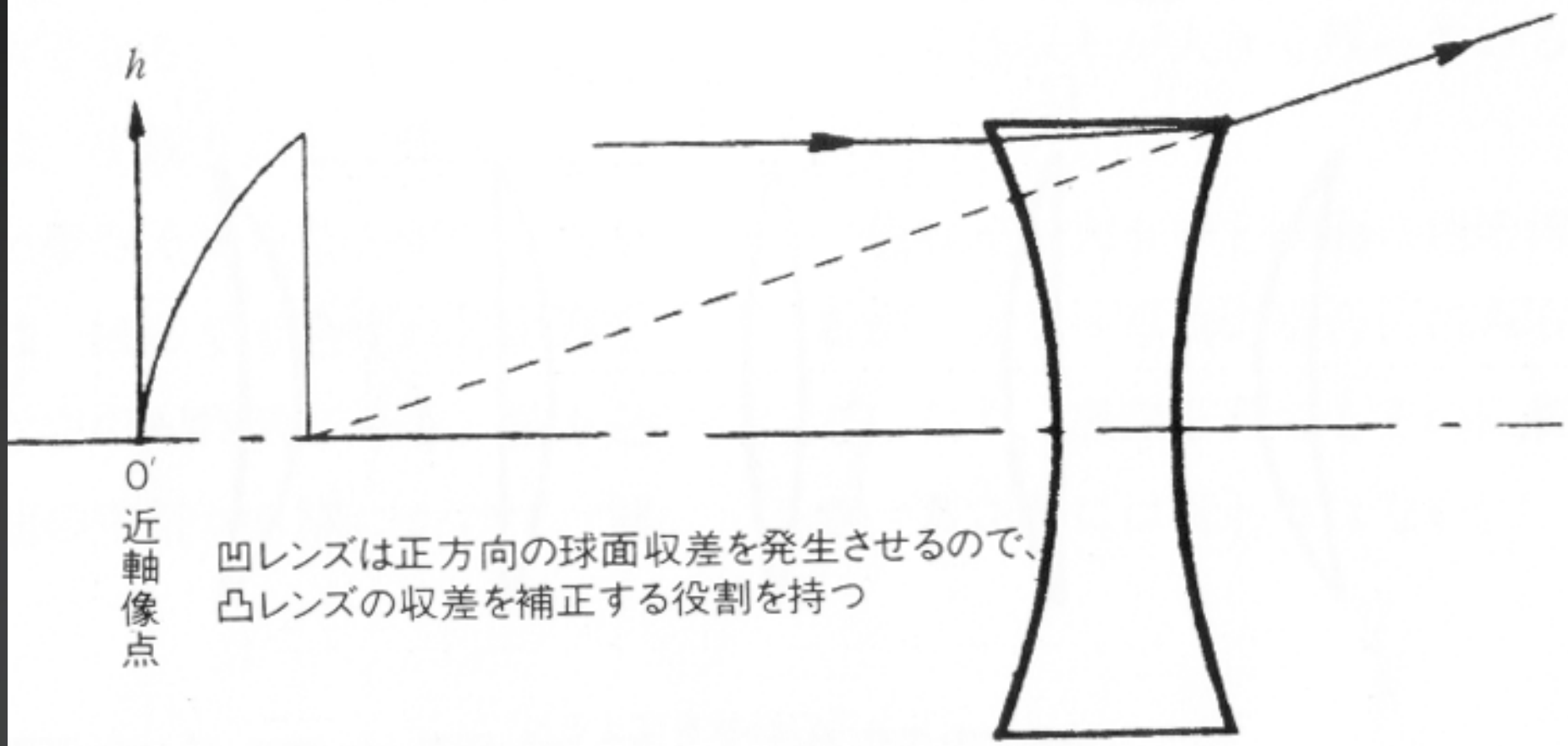
- レンズの変形 (ベンディング)
- レンズの屈折率と厚みのバランス
- レンズの分割 (薄いレンズ 2枚へ分割など)
- 凹レンズと凸レンズの組み合わせ



球面収差のコントロール(2)



図3・9 凹レンズの球面収差



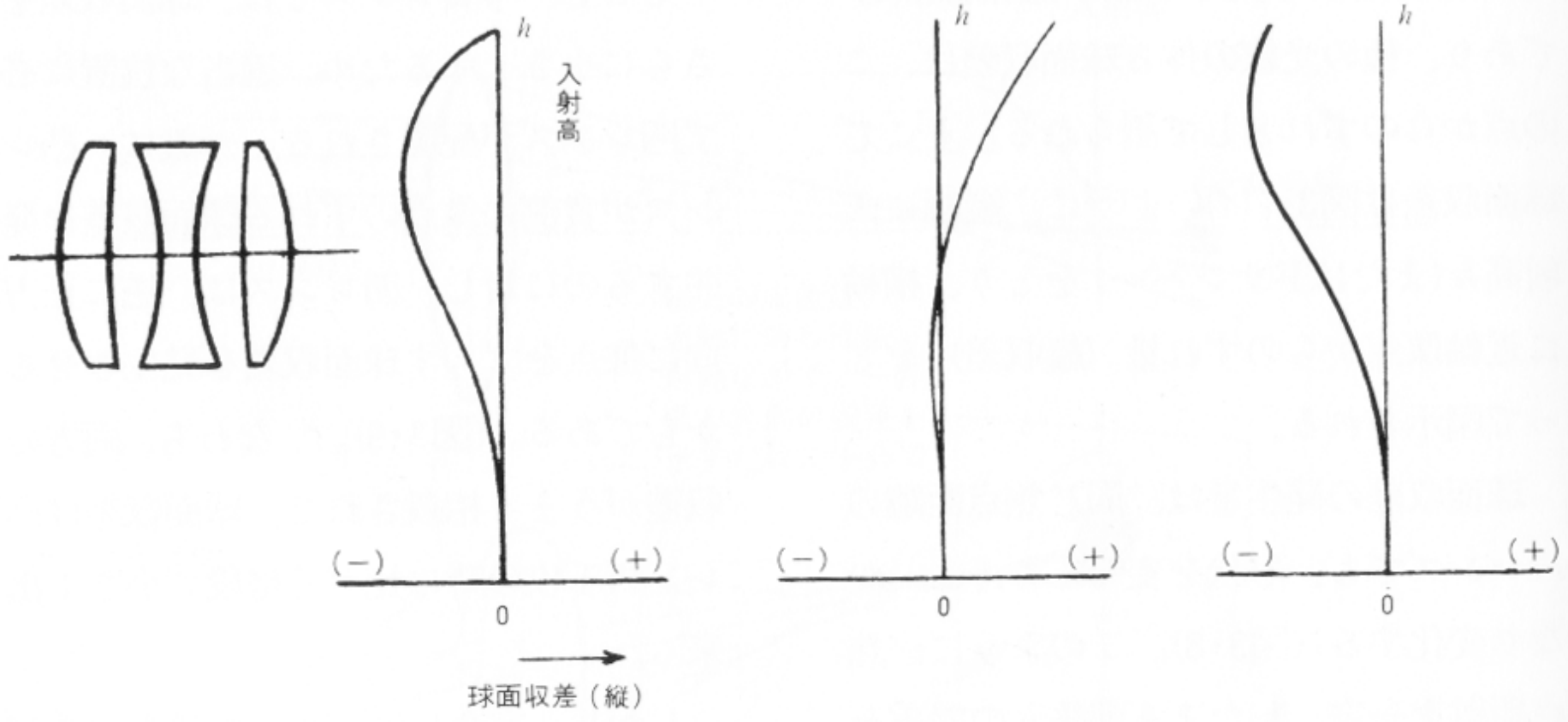
凹レンズは正方向の球面収差を発生させるので、
凸レンズの収差を補正する役割を持つ



球面収差の例(1)



図3・10 球面収差曲線の例

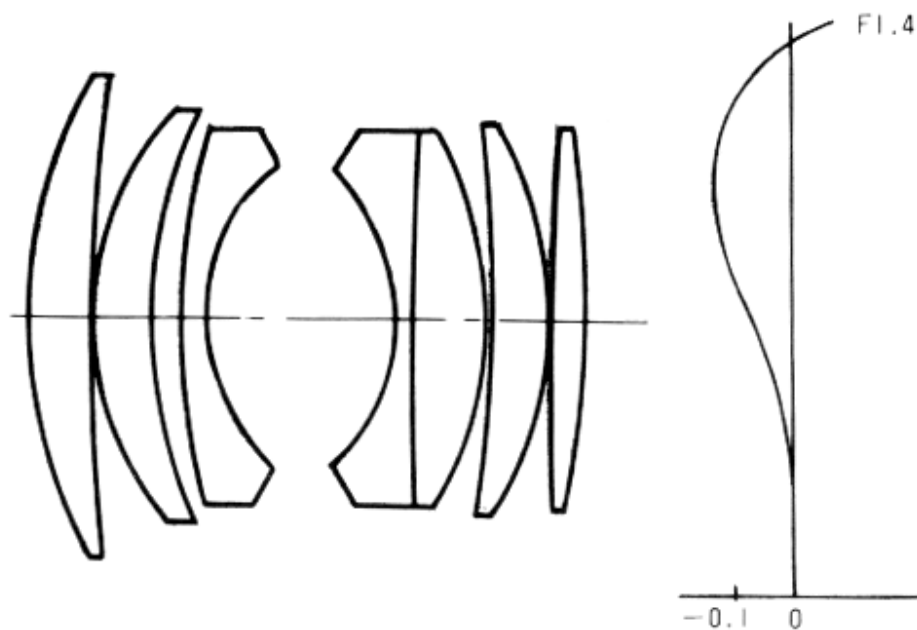




球面収差の例(2)



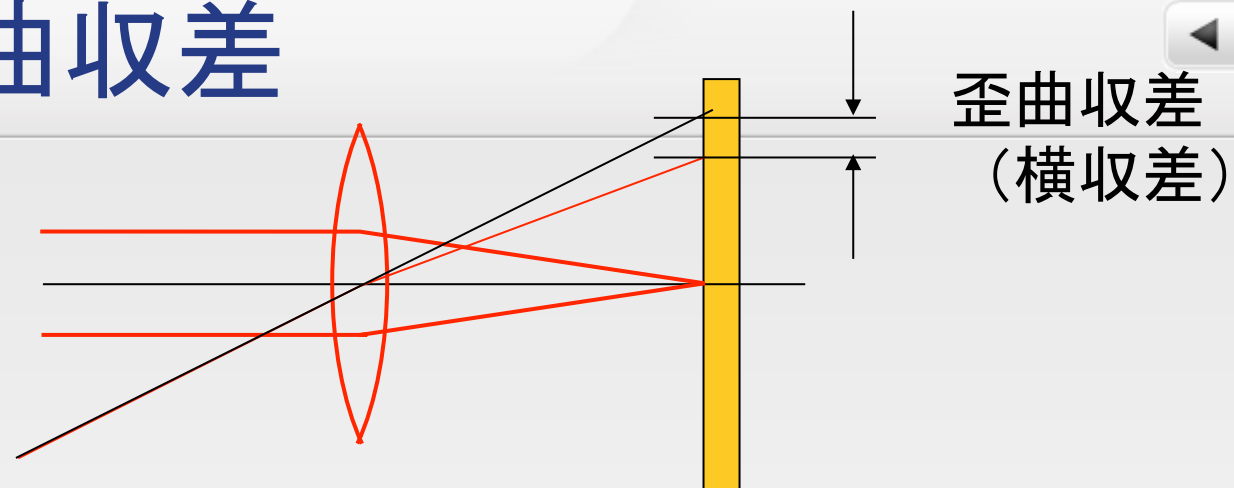
図3・12 50mm F1.4標準レンズの構成と球面収差



- 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

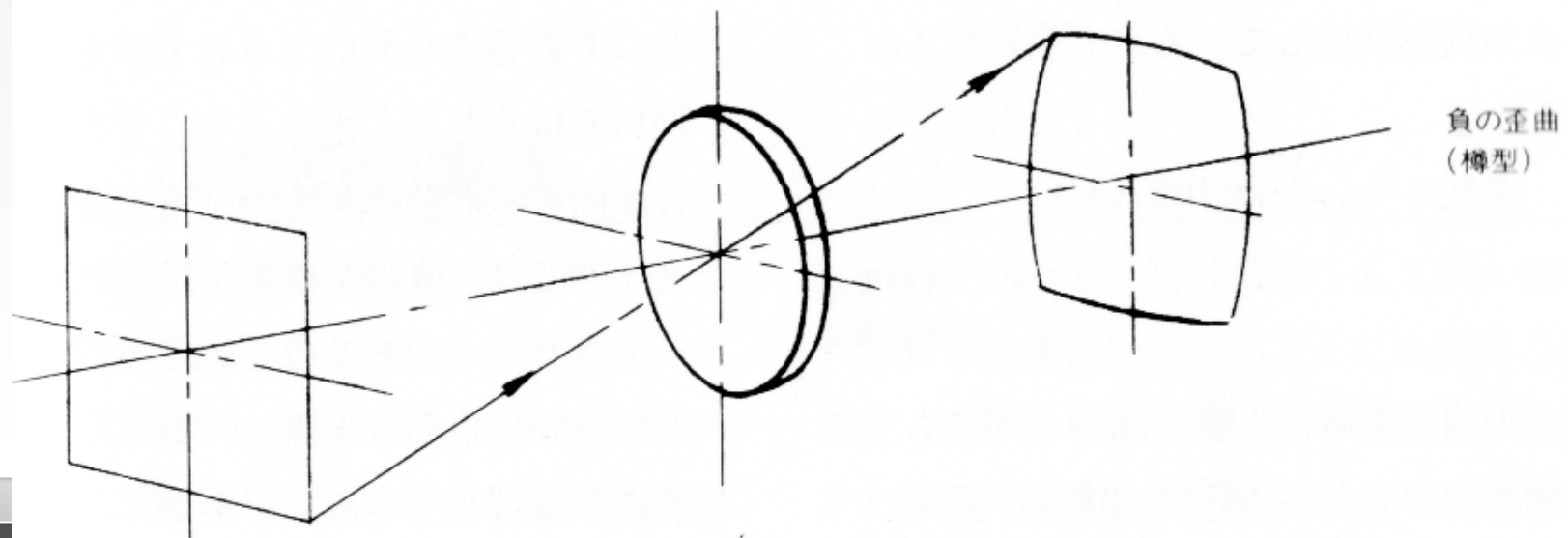
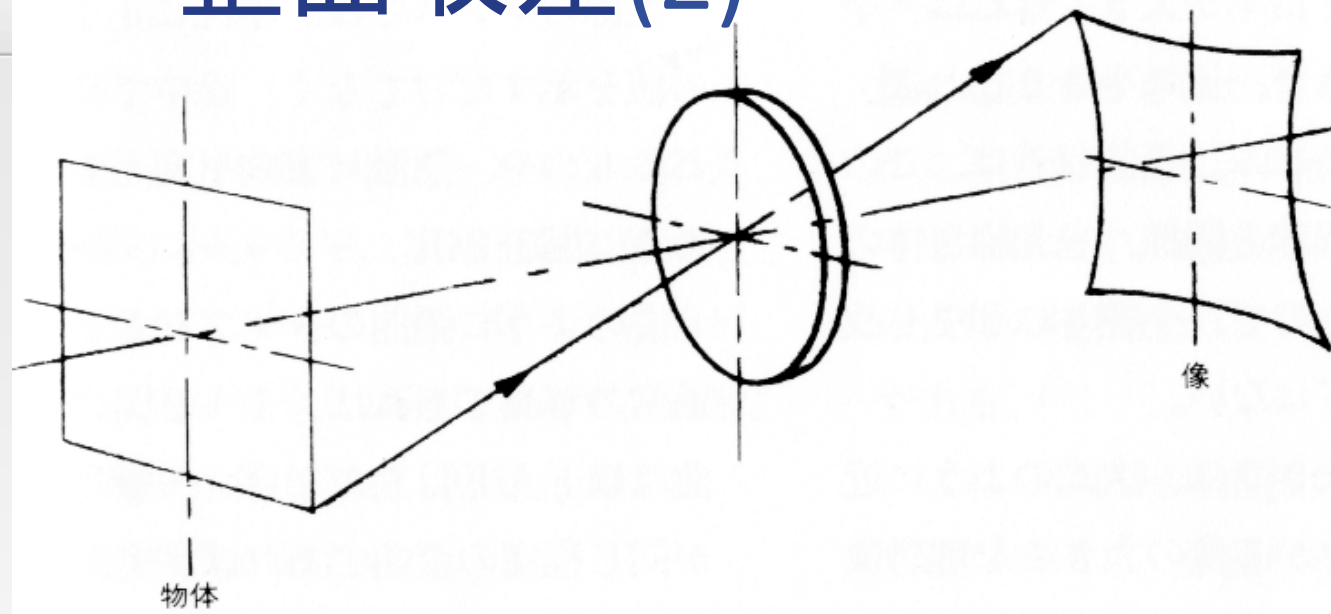


歪曲収差



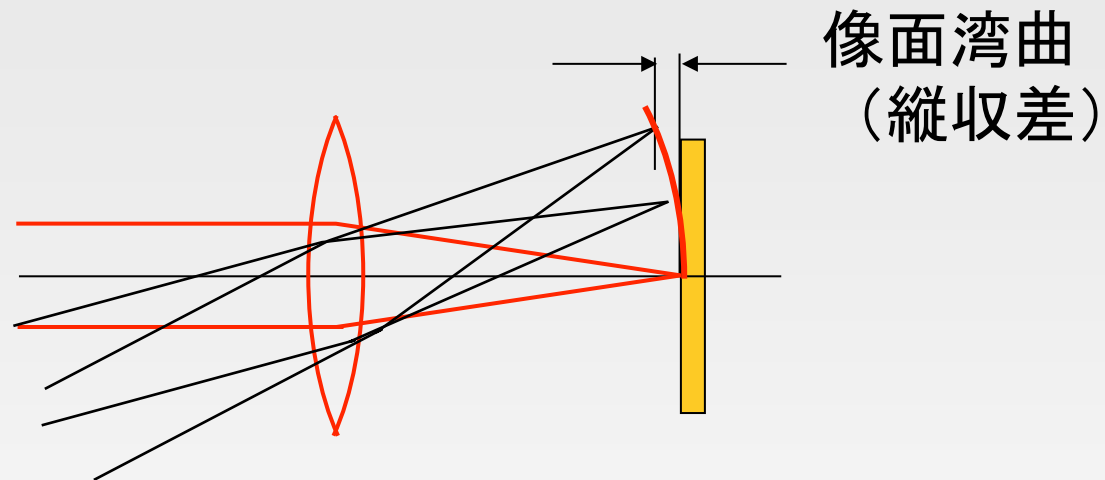
- 像高（画角）によって結像点が横にずれる現象（画面全体が歪む）
- 入射高 $h = 0$ （中心光束のみ）
- 通常の写真用レンズで許容されるのは2%程度まで
 - たる型収差のほうが目立ちにくく，好まれる

歪曲収差(2)



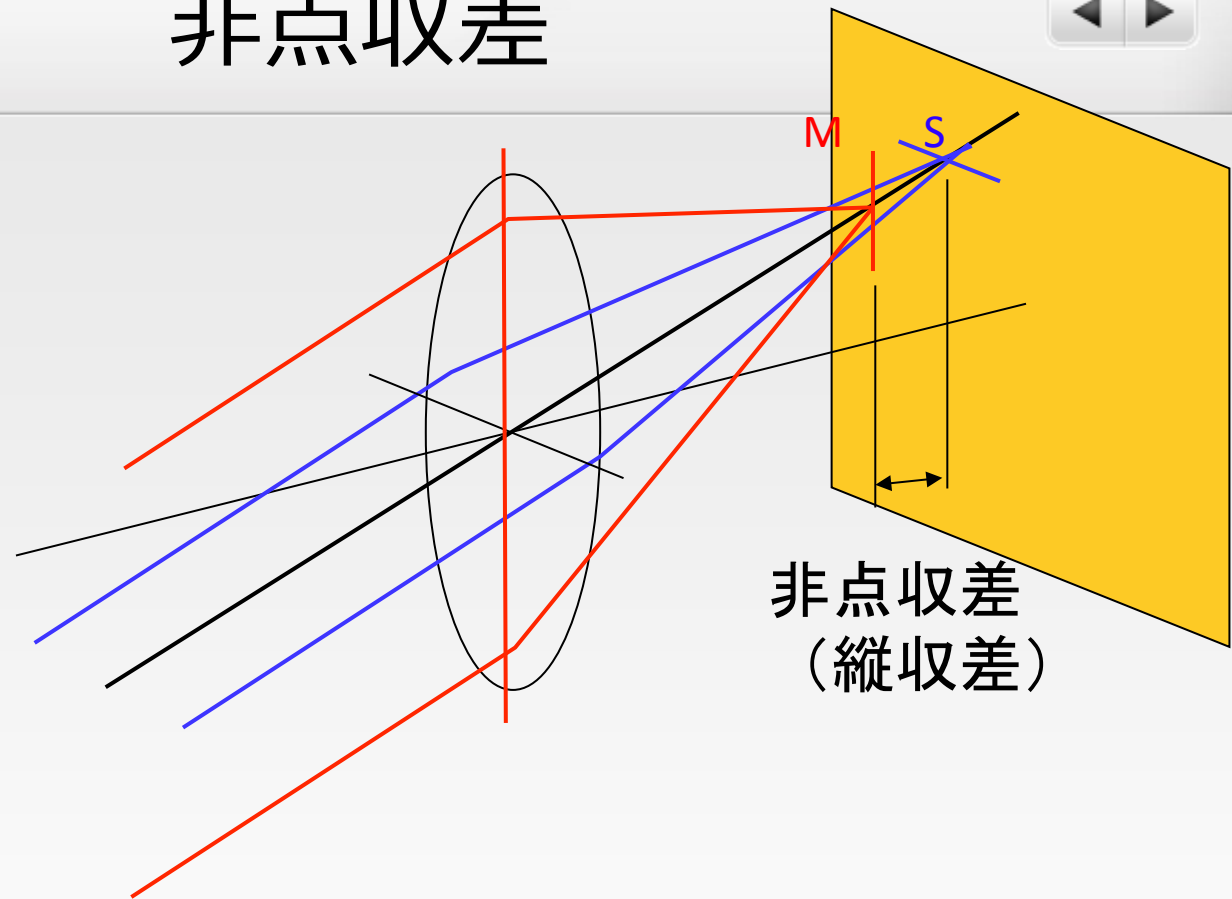


像面湾曲



- 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)

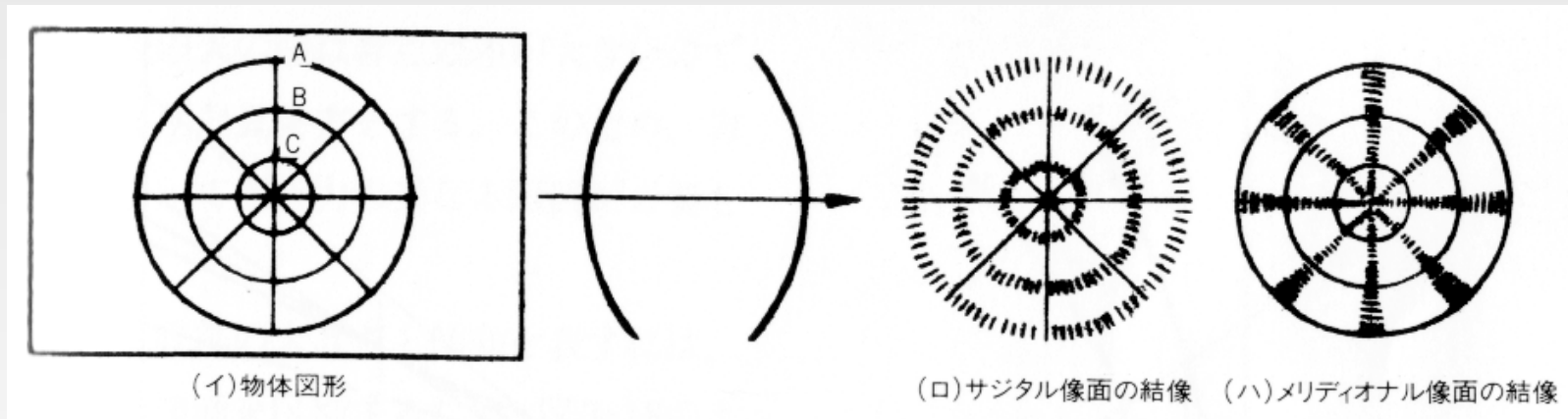
非点収差



- 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)



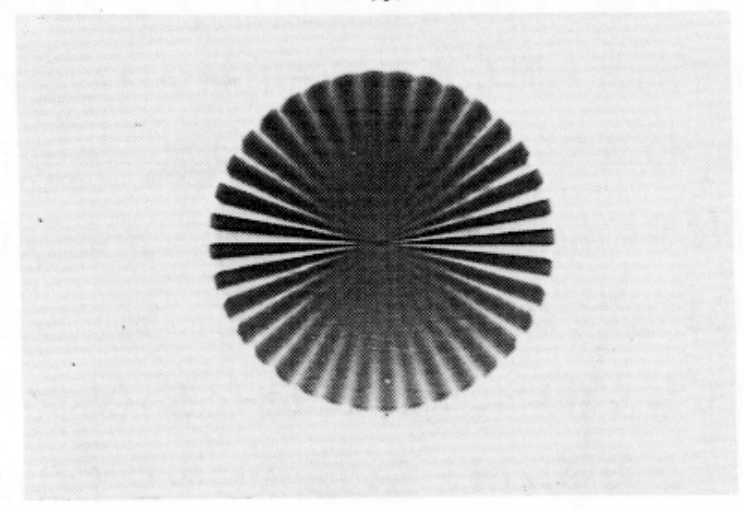
- メリディオナル (meridional)
 - 子午線の・経線の
- サジタル (sagittal)
 - 矢の・矢じり状の



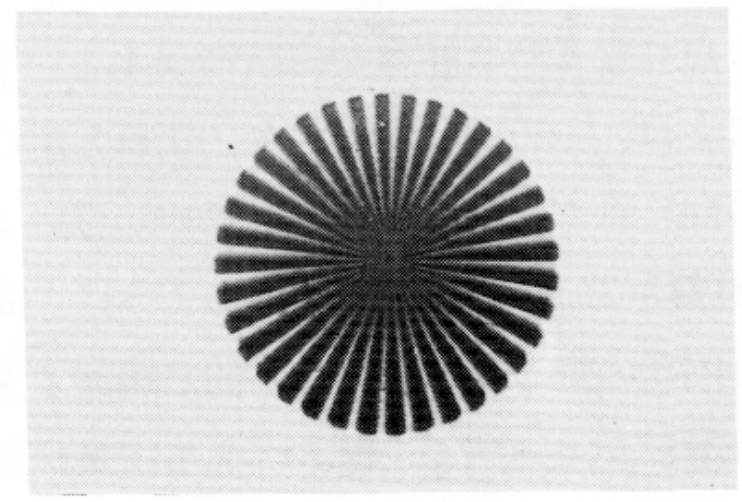
非点収差(3)



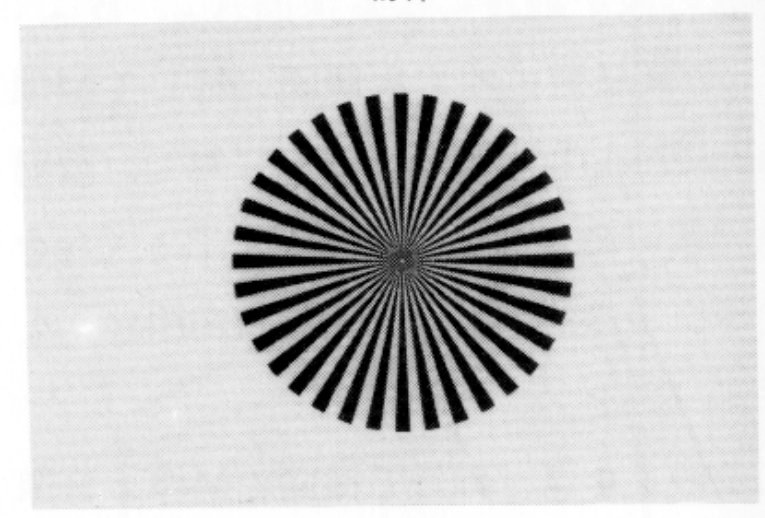
M像



中間像



物体



S像

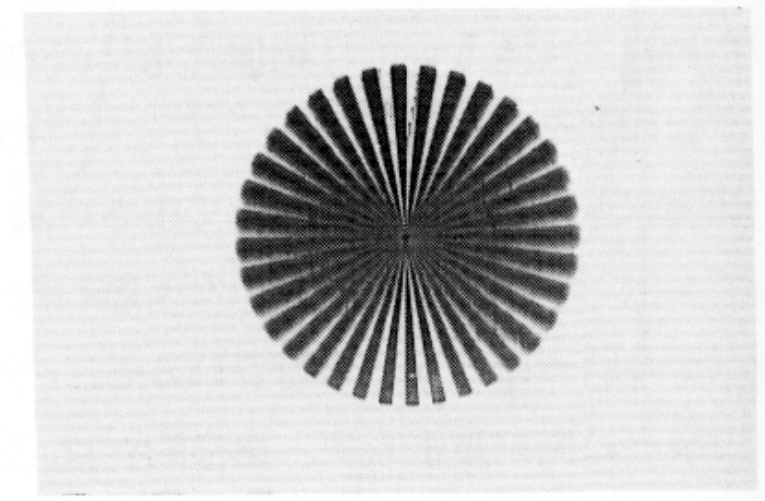
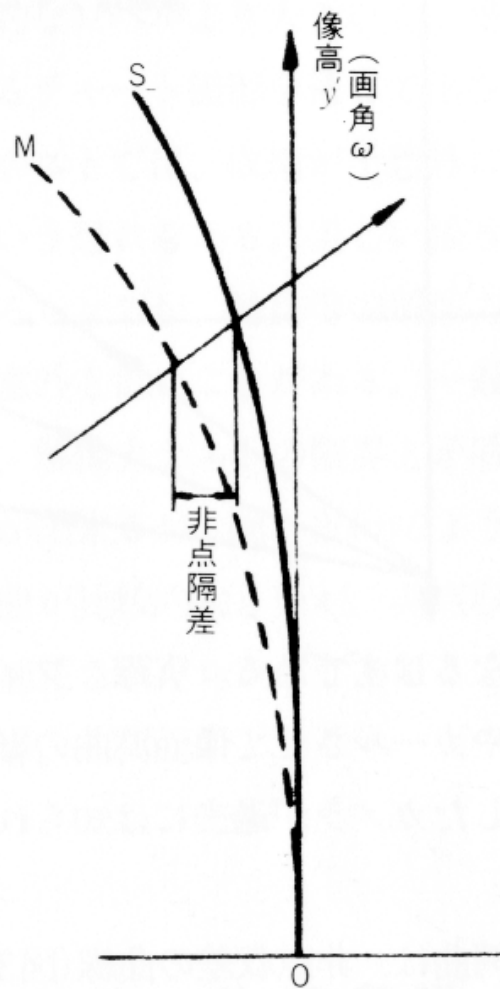


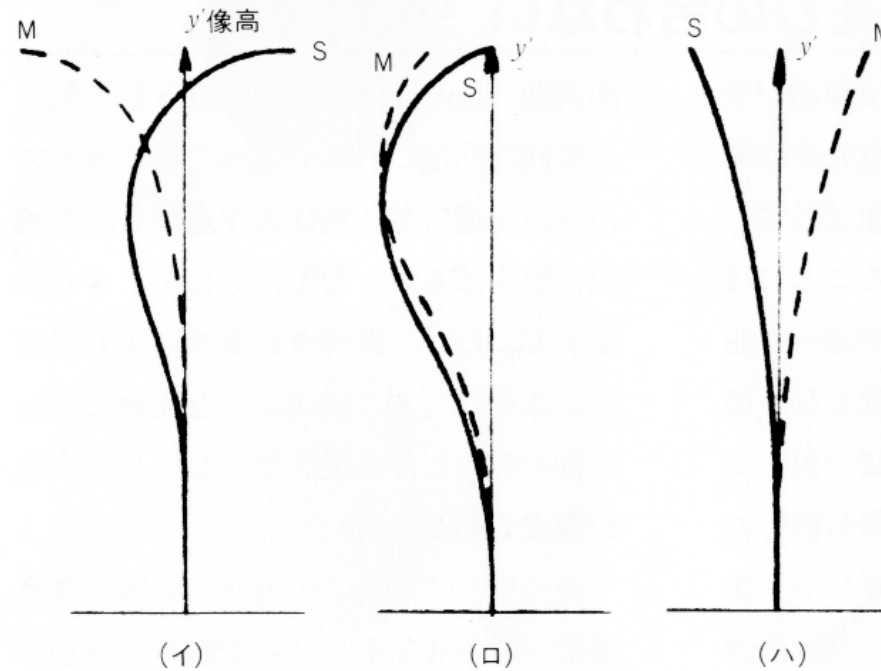
図3・18 非点収差曲線



非点較差

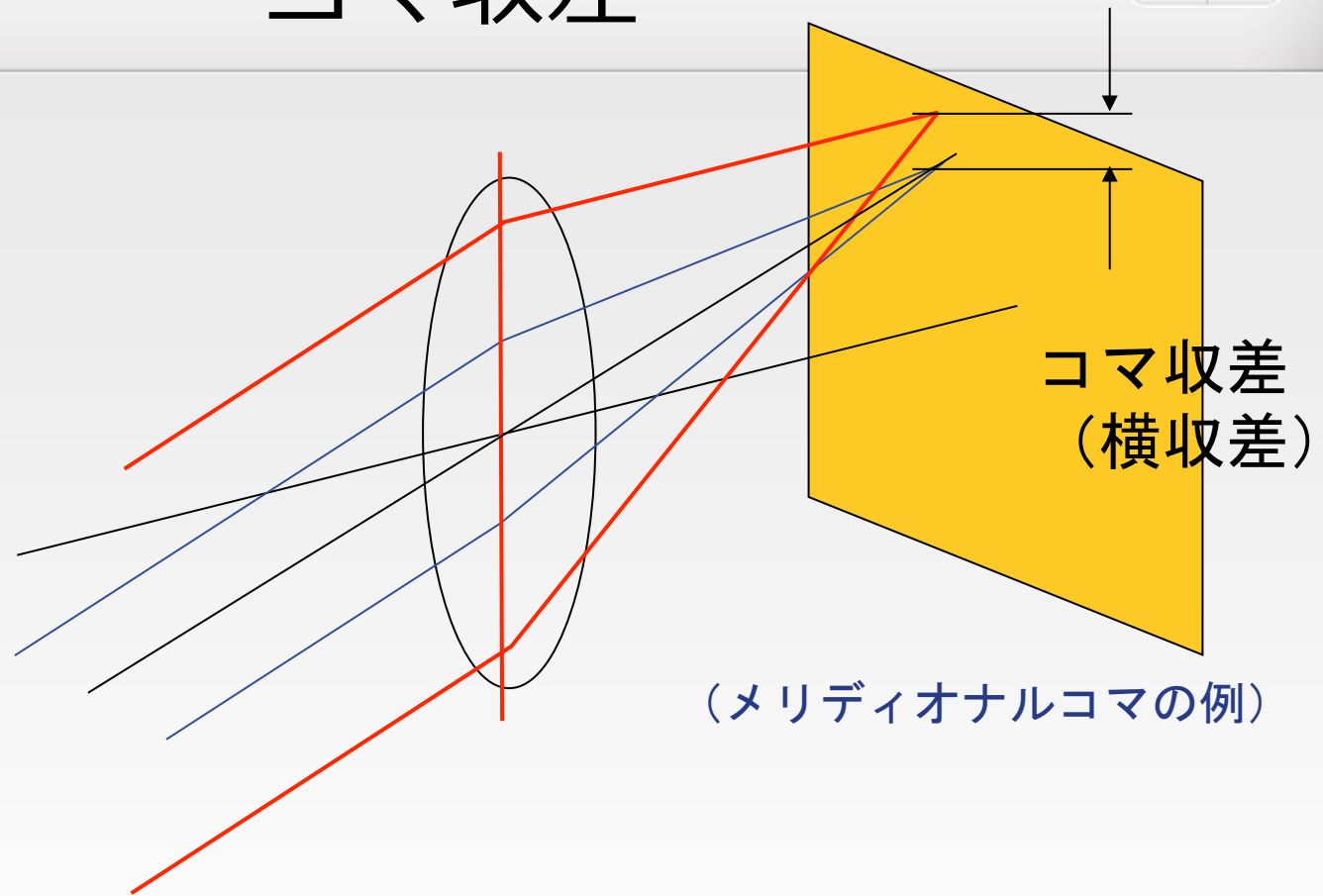


図3・20 像面特性の色々



- 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

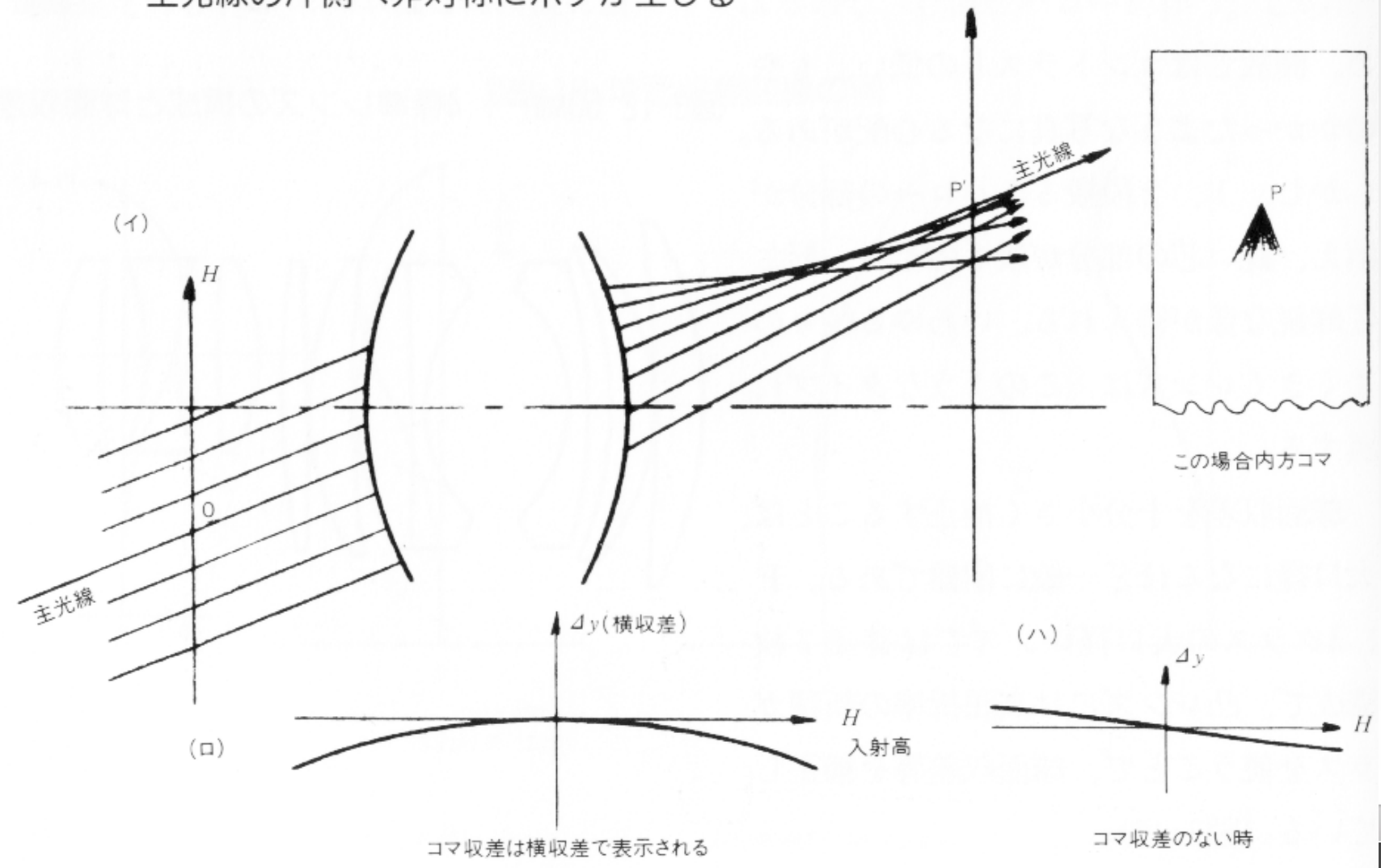


- 入射高によって結像点が**横**にずれる現象
 - 入射高//像高 メリディオナルコマ
 - 入射高⊥像高 サジタルコマ



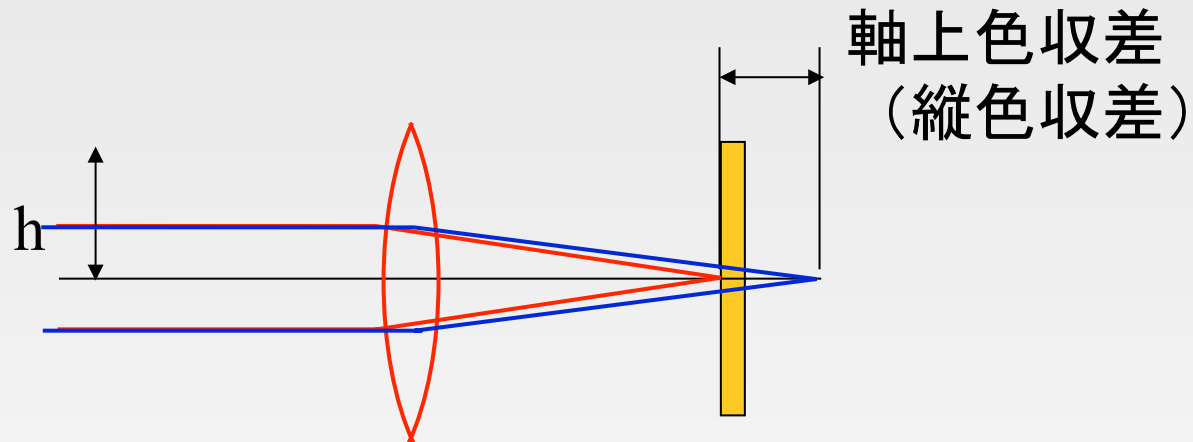
コマ収差(2)

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





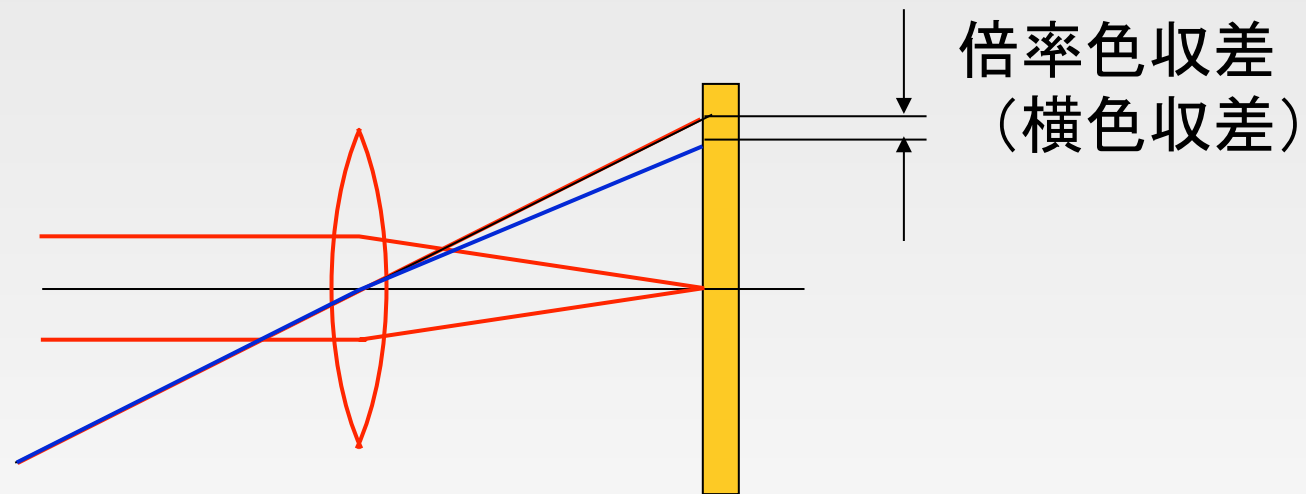
軸上色収差



- 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



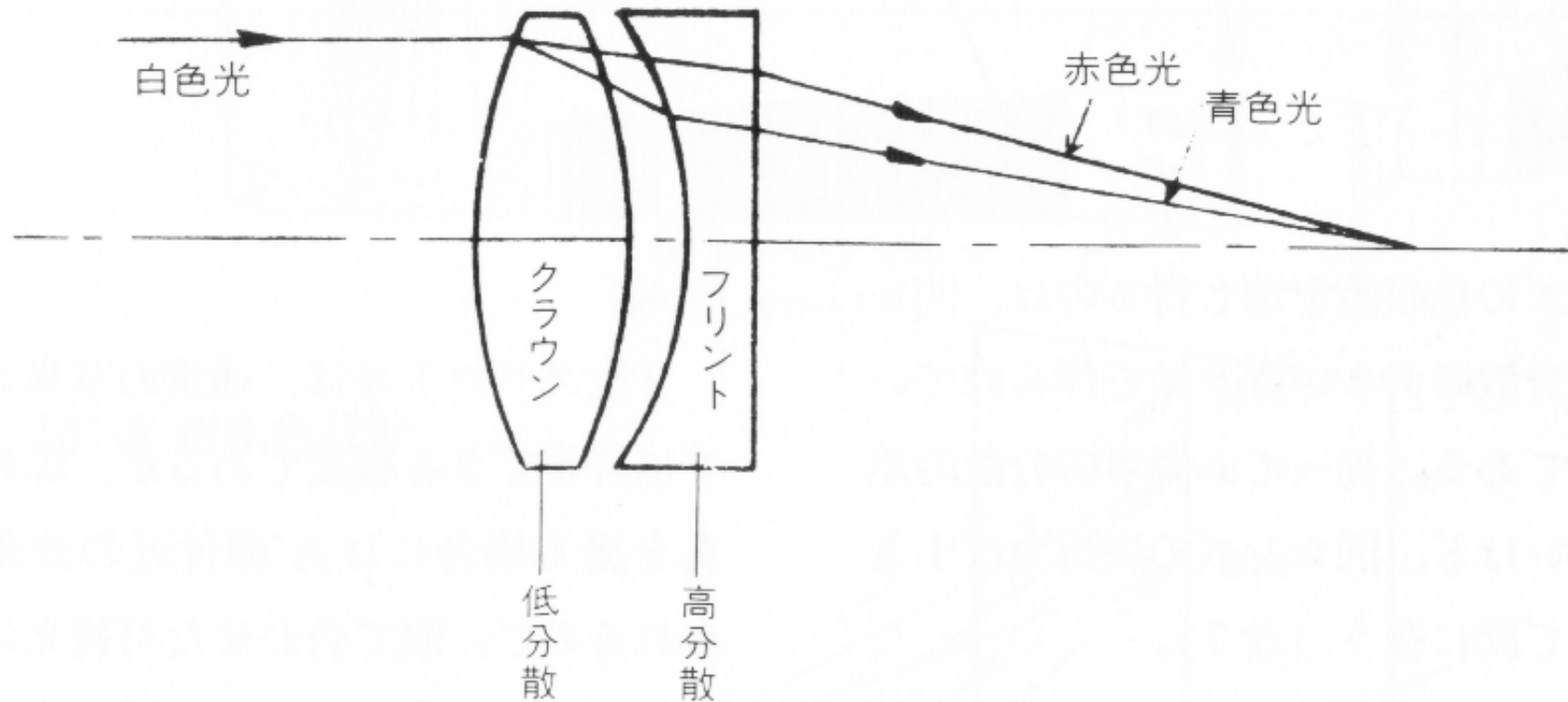
倍率色収差



- 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



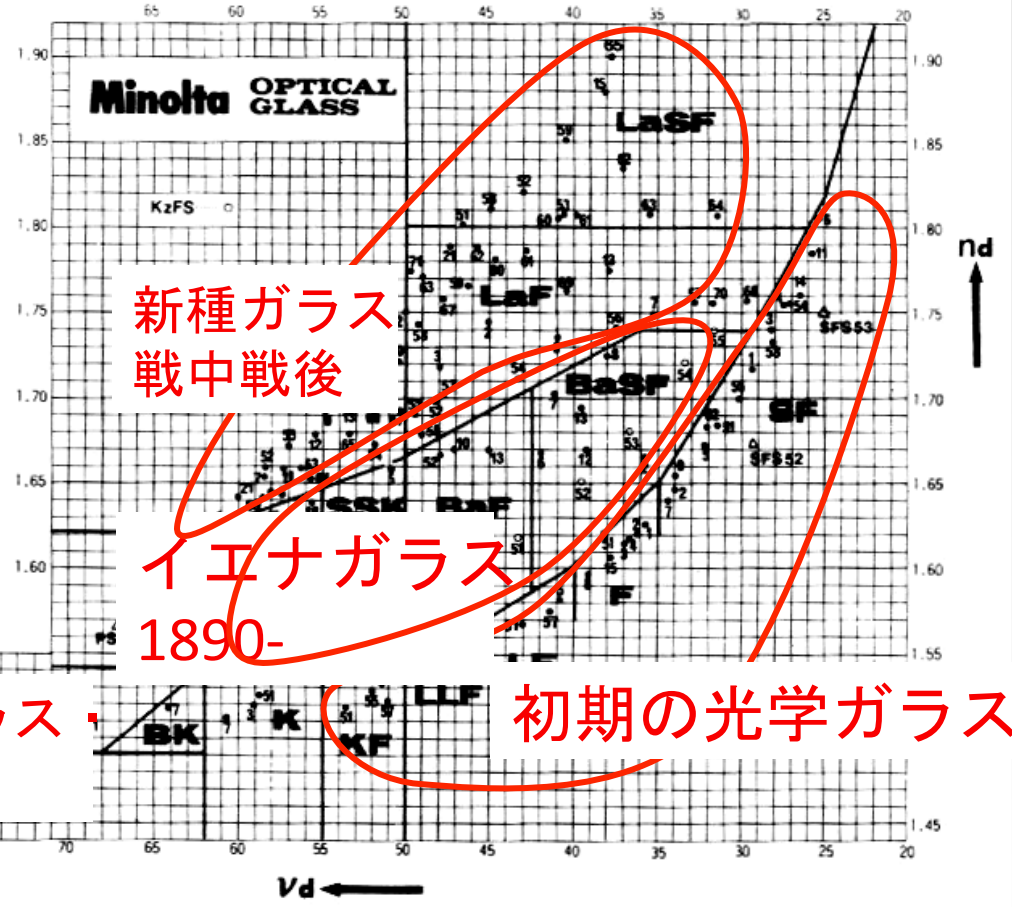
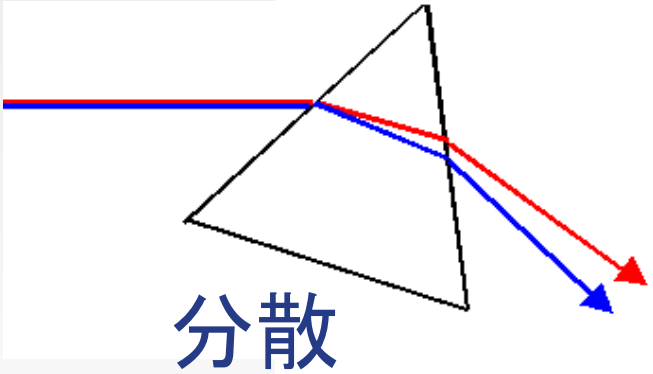
- 分散の違う2種類のガラスで色収差を相殺
- ただし非線形成分は相殺できない



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

イェナガラス
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



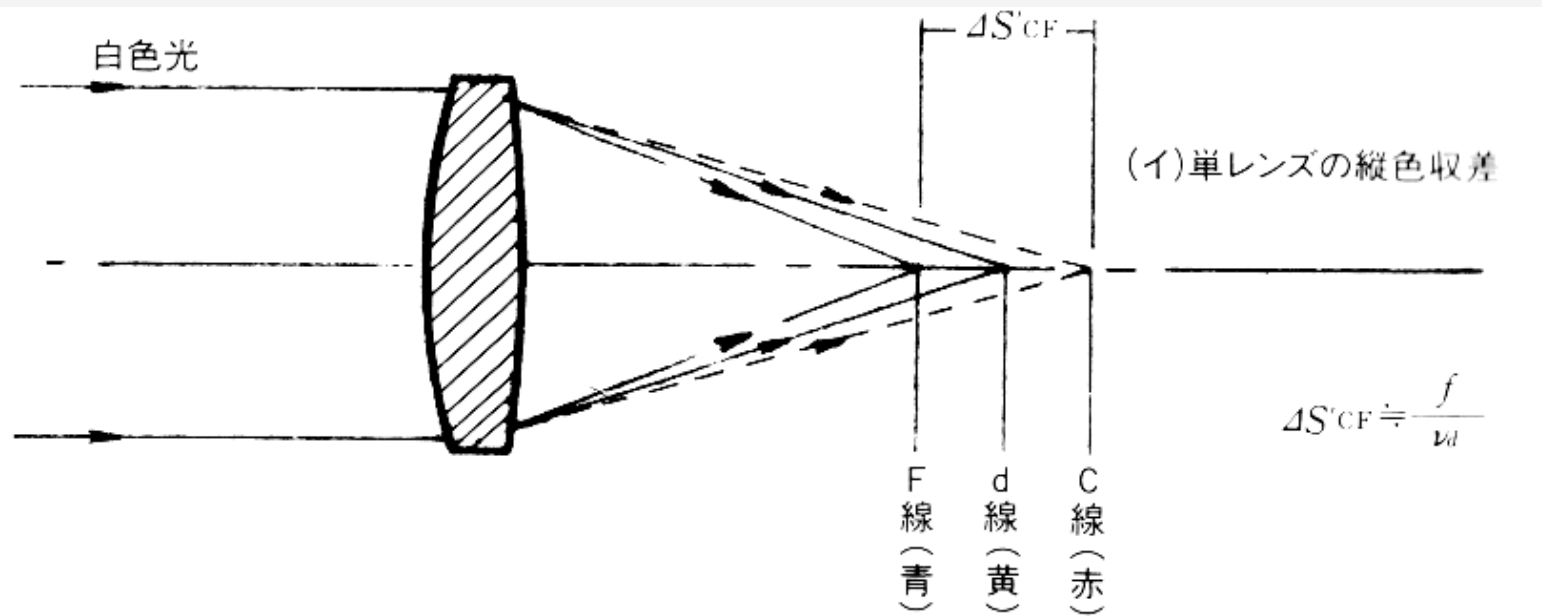
表2・1 光学ガラスの例

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 ₂ , K ₂ O
フ リ ン ト	F	F 2	1.62004	36.37	SiO ₂ , PbO, K ₂ O
軽 フ リ ン ト	LF	LF 1	1.57309	42.58	SiO ₂ , PbO, K ₂ O
バリウムフリント	BaF	BaF10	1.67003	47.11	BaO, SiO ₂ , B ₂ O ₃
バリウムクラウン	BaK	BaK 1	1.57250	57.55	SiO ₂ , BaO, ZnO
重 ク ラ ウ ン	SK	SK16	1.62041	60.33	BaO, SiO ₂ , B ₂ O ₃
硼 硅 ク ラ ウ ン	BK	BK 7	1.51680	64.17	SiO ₂ , B ₂ O ₃ , Na ₂ O, K ₂ O
カルツフリント	KzF	KzF 1	1.55115	49.68	SiO ₂ , Sb ₂ O ₃ , B ₂ O ₃ , K ₂ O
ランタンフリント	LaF	LaF 2	1.74400	44.77	B ₂ O ₃ , La ₂ O ₃ , PbO
ランタンクラウン	LaK	LaK10	1.72000	50.41	B ₂ O ₃ , La ₂ O ₃ , 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, ...

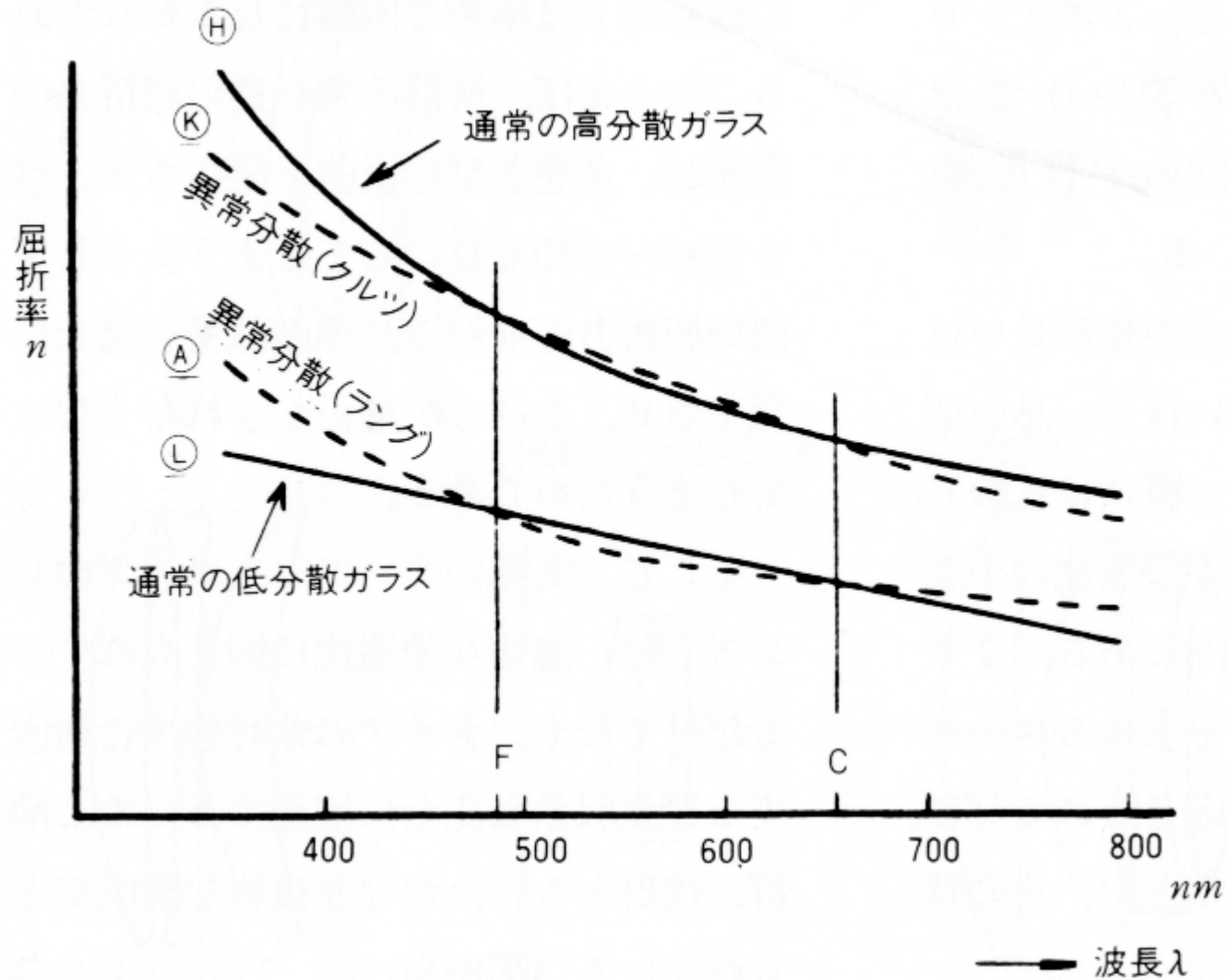
なぜいろいろなガラスが要るのか

- 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

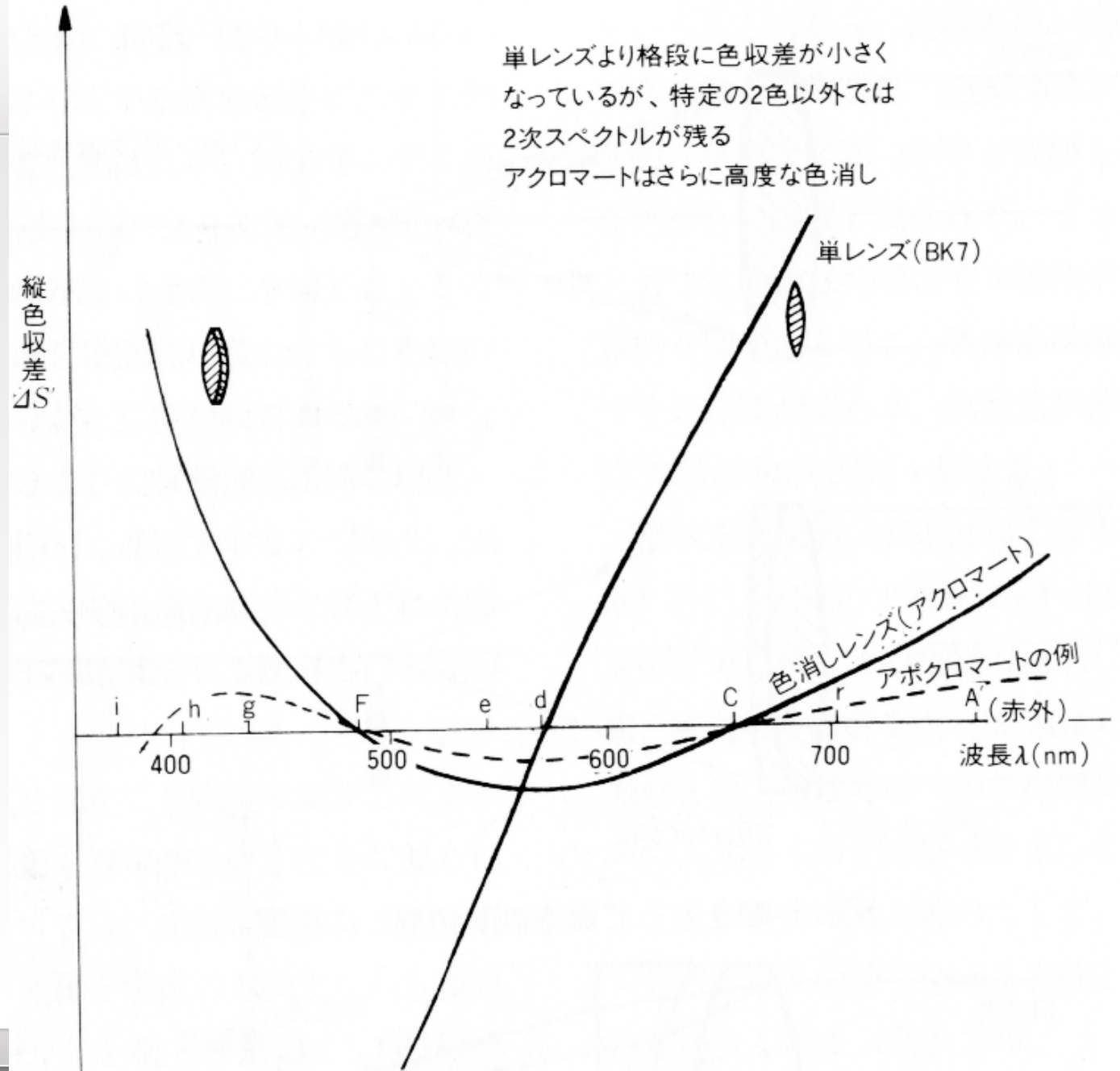
図8・6 異常分散性の模式的な説明



色収差の補正

図3・4 色消しレンズの効果

単レンズより格段に色収差が小さく
なっているが、特定の2色以外では
2次スペクトルが残る
アクロマートはさらに高度な色消し





ザイデル5収差の分類



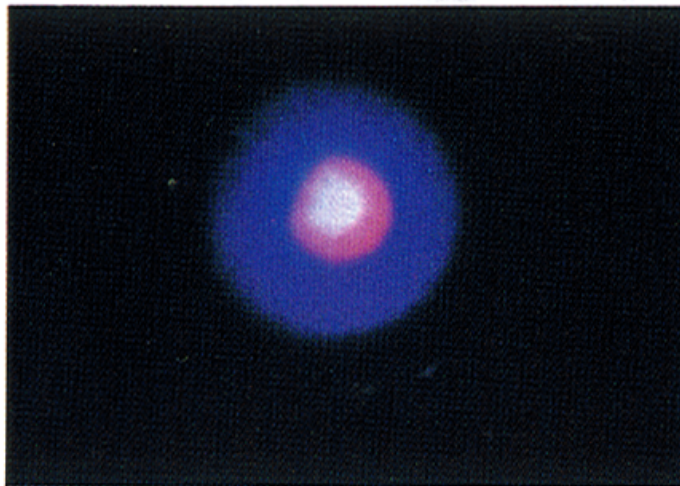
	原因	縦収差	横収差
単色収差	入射高 (光束の太さ)	球面収差	コマ収差
	像高 (画角)	{ 像面湾曲 非点収差	歪曲収差
色収差		軸上色収差	倍率色収差



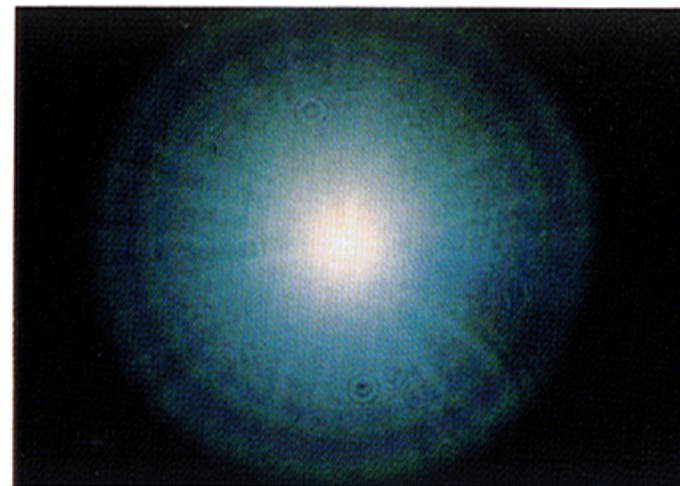
収差の実例(1)



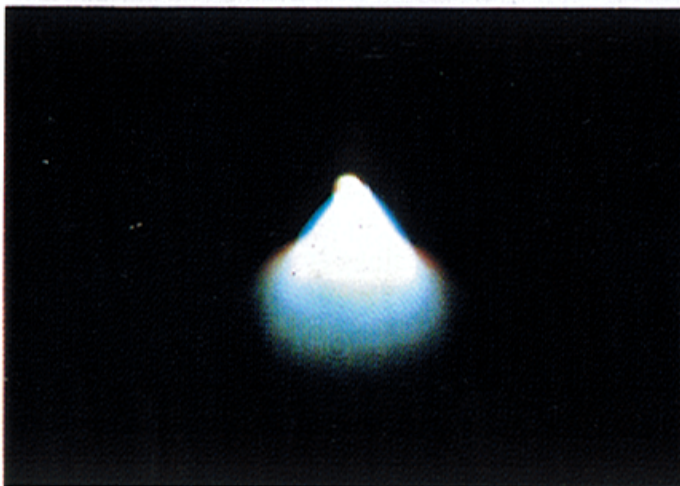
点光源の像に現れた収差 (約100倍に拡大)



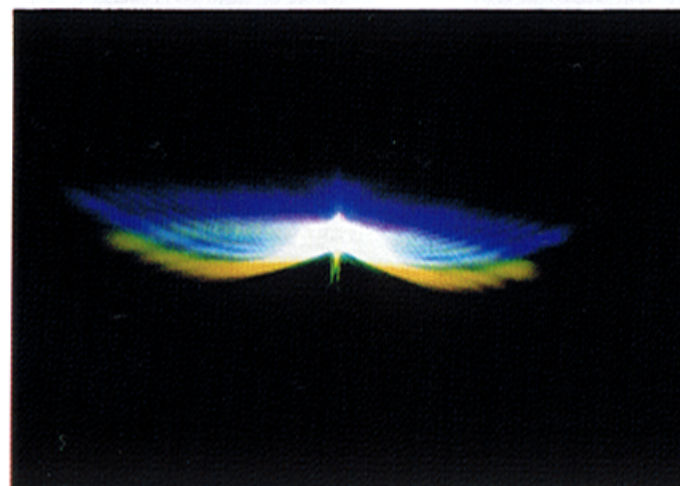
縦色収差



球面収差



コマ収差



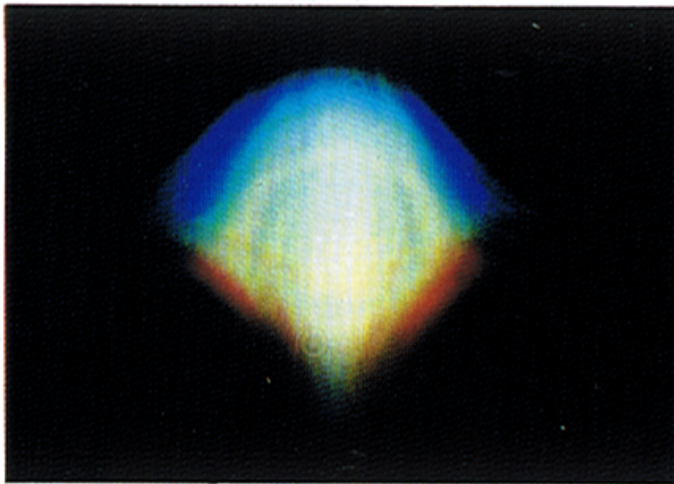
コマ収差



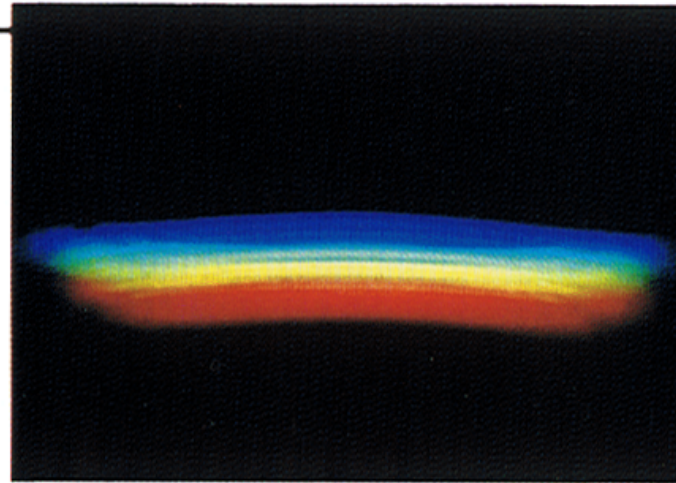
収差の実例(2)



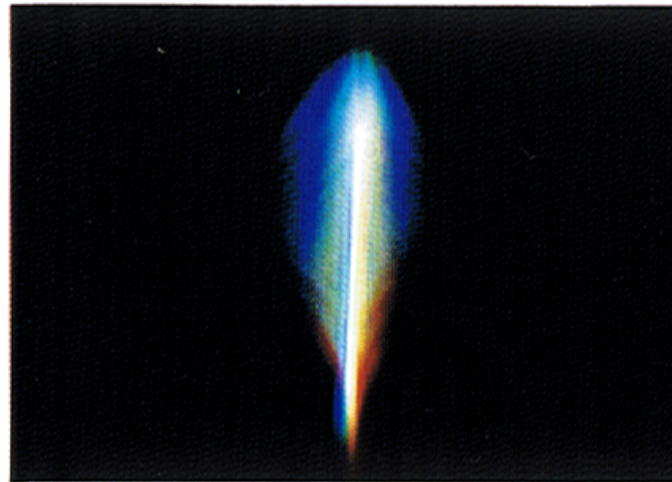
非点収差



中間像



M像 (倍率色収差も見える)



S像