

エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

CEDEC

CESA Developers Conference

2010

**魅力ある絵作りのために
知っておきたい色光学豆知識**

シリコンスタジオ株式会社
川瀬 正樹

- 光学の基本
- レンズの仕組み
- 画角と実効F値
- 錯乱円
- 現実のレンズ
- フォーカシング
- ズーミング
- カメラ座標系
- 用途別のカメラとレンズ
- 撮像フォーマットと回折限界
- カメラパラメタの設定
- まとめ
- Appendix

エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

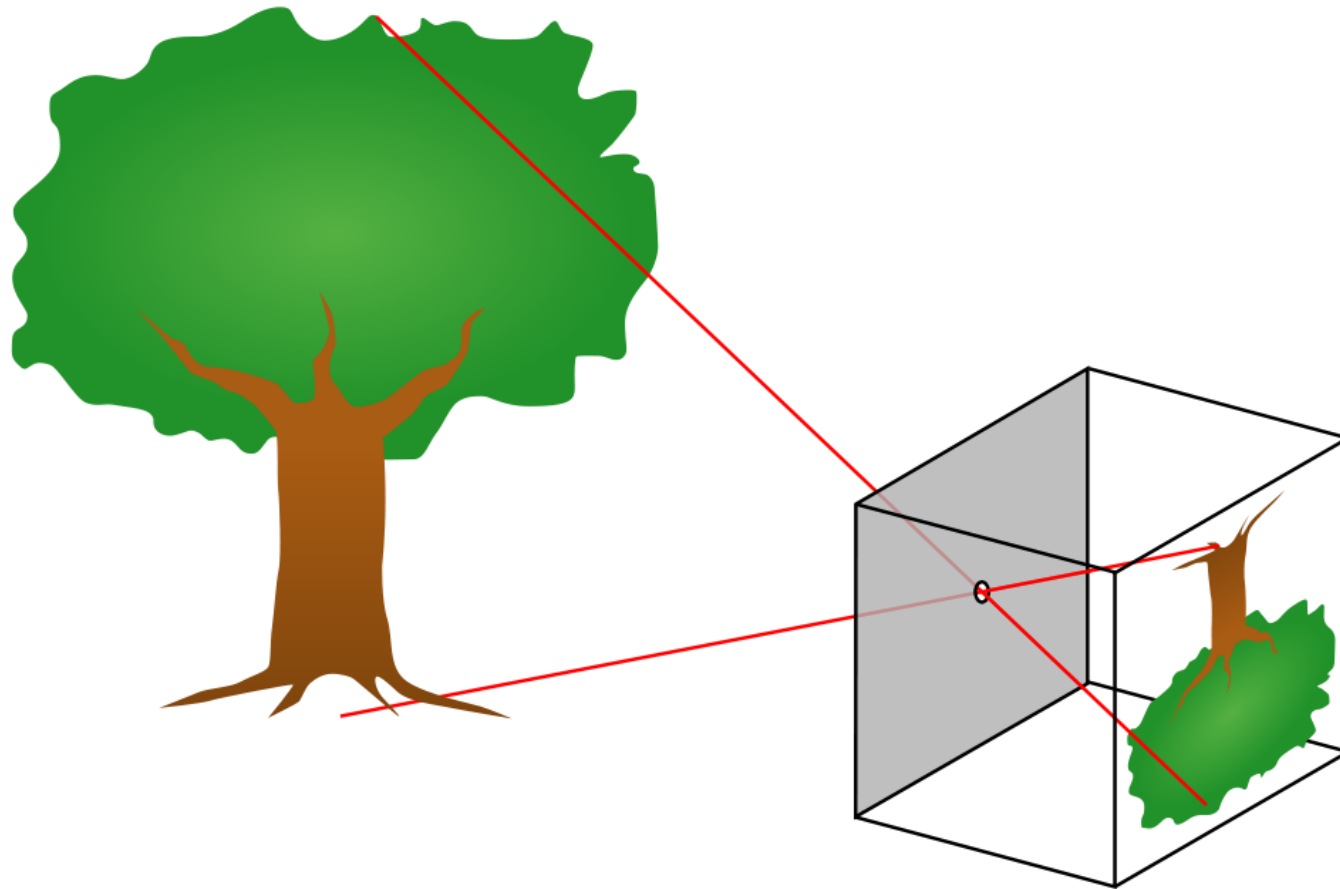
CEDEC

CESA Developers Conference

2010

光学の基本

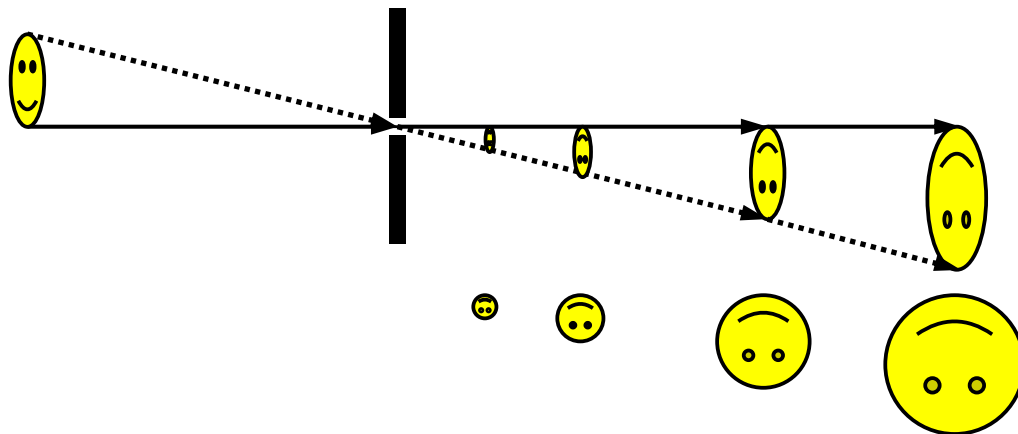
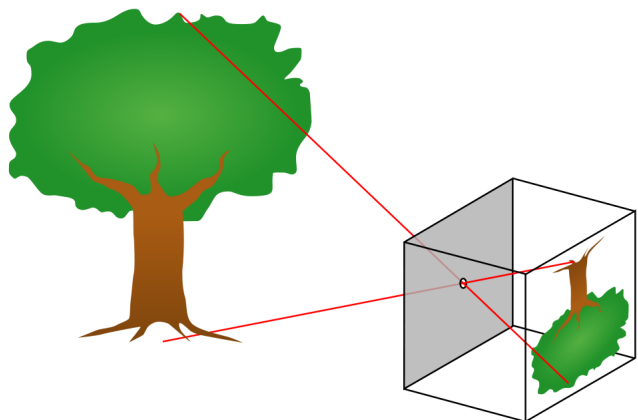
- カメラ・オブスキュラ (camera obscura)
 - カメラの語源
- ピンホールカメラ (pinhole camera)
- 小さな穴が開いた暗室
 - レンズなし
 - これで倒立像が映ることはよく知られていた
 - 正しいパースの絵を描くために利用されていた



How a [pinhole camera](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pinhole-camera.svg) works. By [Bob Mellish](#)
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pinhole-camera.svg>

ピンホールではダメなのか？

- 全体的に像がぼけている
 - ピンホールは完全な点ではない
 - 完全な点にすると暗くて見えなくなる
- 暗い
 - 穴を小さくするほど絵が暗くなる
 - 絵を大きく投影するほど暗くなる
 - 同じ光量を広い面積に投影するため
 - 面積に反比例(距離の二乗減衰)



ピンホールではダメなのか？

- もっと明るくしたい
 - 被写体からの光をなるべく多く集める必要がある
 - 穴を大きくしなければならない
- もっとシャープに写したい
 - 被写体の一点から出た光は一点に集めたい
 - 光を一点に集めなければならない
- 大きな穴を通過してかつ一点に集める

大きな穴を通して一点に集める

- 凸レンズがまさにその性質をもっている
 - 集光と結像
 - 光を集めて実像を結ぶことができる
 - 凹面鏡も同様
- ピンホールよりも大きな穴（絞り）
 - より多くの光を集められるため明るい
- ピンホールよりもシャープ
 - 光が一点に集まるため

エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

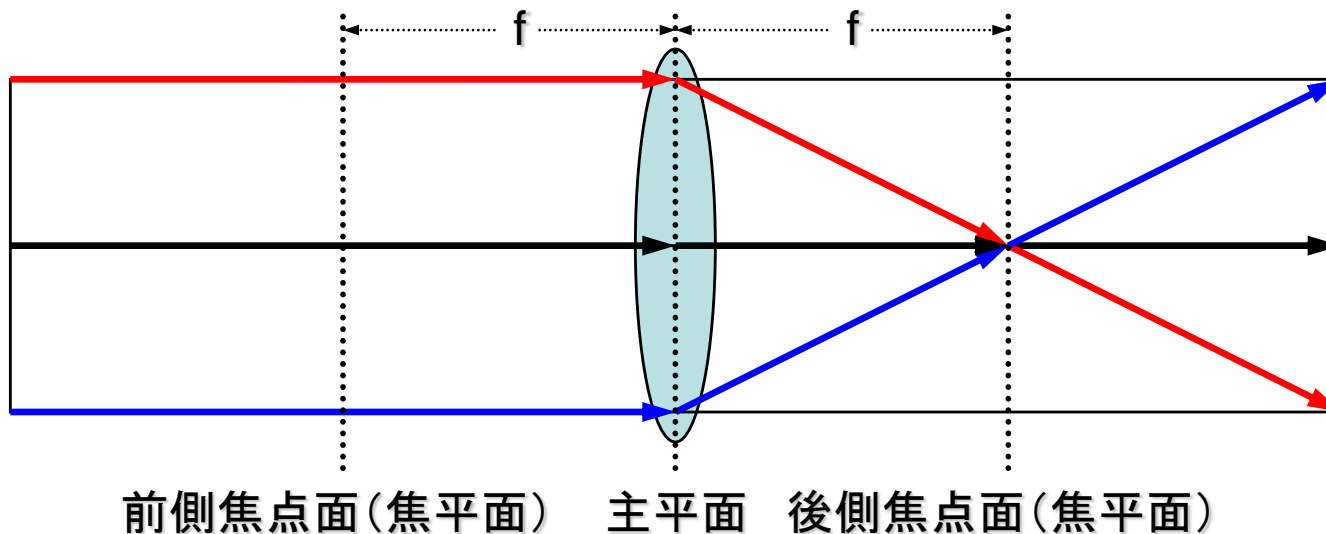
CEDEC

CESA Developers Conference

2010

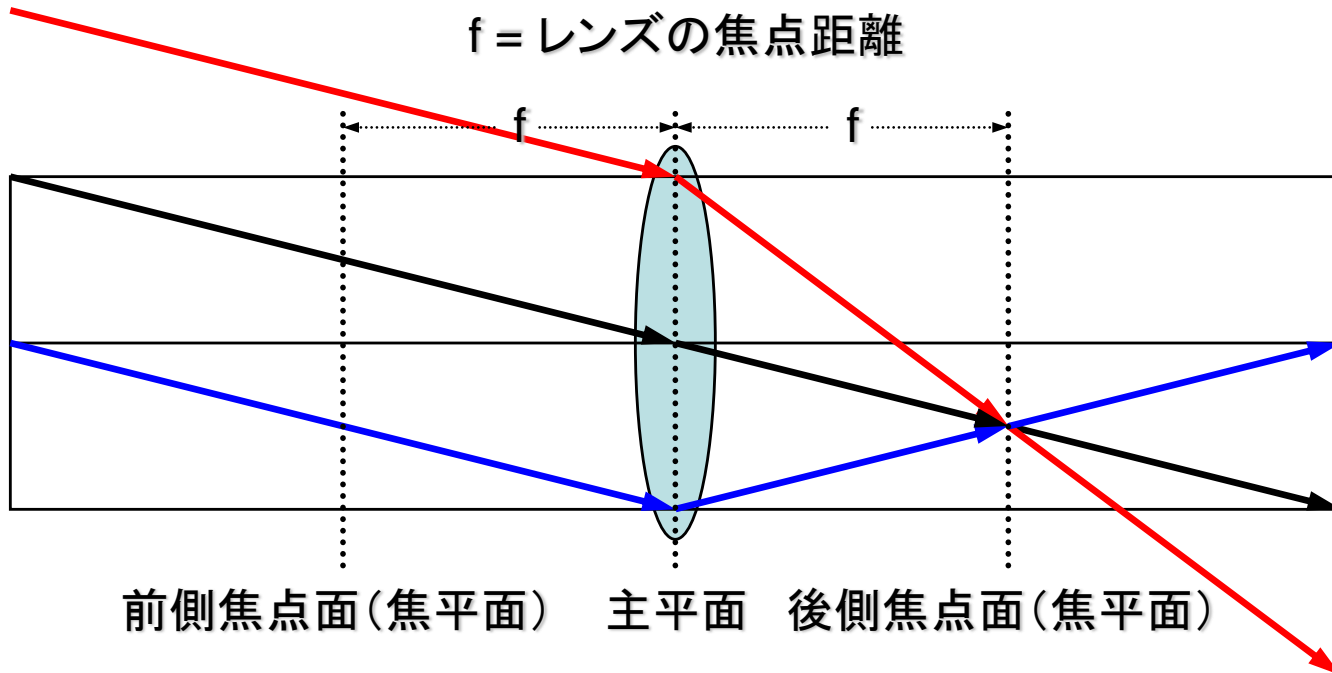
レンズの仕組み おさらい

f = レンズの焦点距離



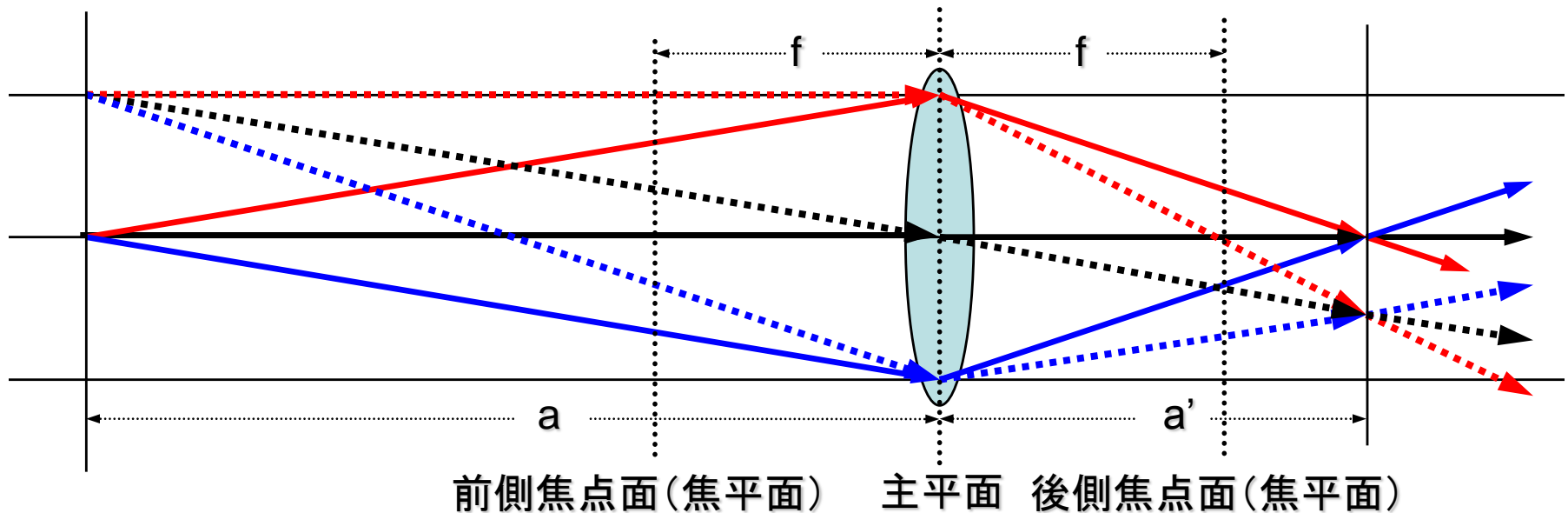
- 主平面(あるいは主面)
 - 光線が屈折する面
 - 主平面上のレンズ中央の一点は主点とよぶ
- 焦点距離(f)
 - 平行光線(無限遠からの光)が焦点を結ぶ主平面からの垂直距離
- 焦点面
 - レンズから垂直方向に焦点距離の位置にある点の集まり(平面)
- 平行光線はレンズの焦点面で交わる

レンズに斜めに入射する平行光の場合



- 斜めの平行光線は焦点面の中央を外れた一点で交わる
- **レンズの中央を通った光線は屈折しない**
 - 斜めから来た光もそのまま真っ直ぐに進む

f = レンズの焦点距離

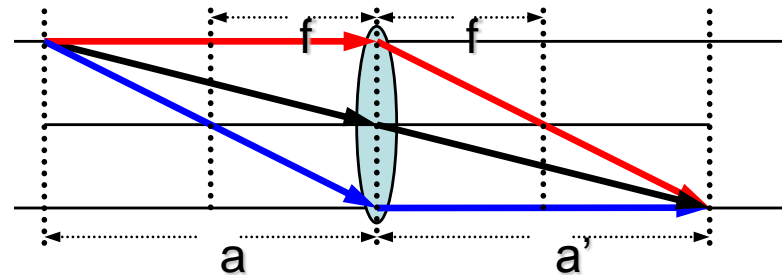
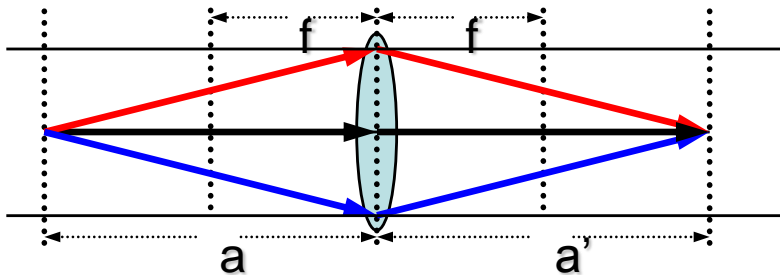
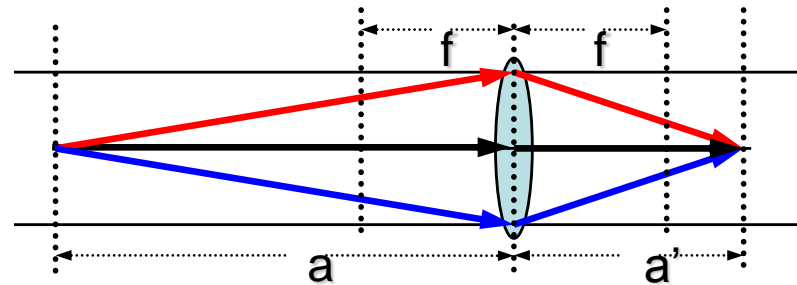


- 一点から来た光線は焦点距離より遠くの一点で交わる
- レンズの中央を通った光線は屈折しない
- 斜めから来た光は中央から外れた位置で交わる

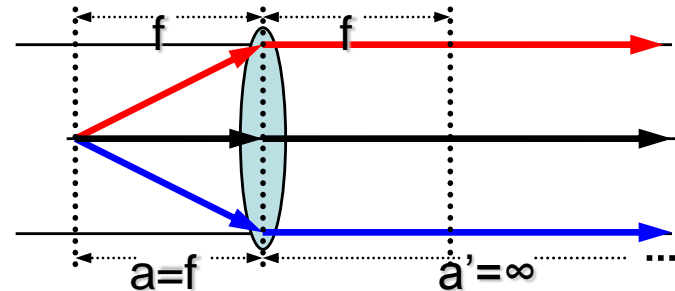
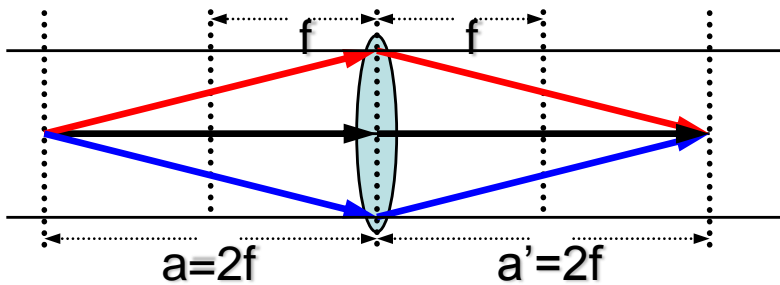
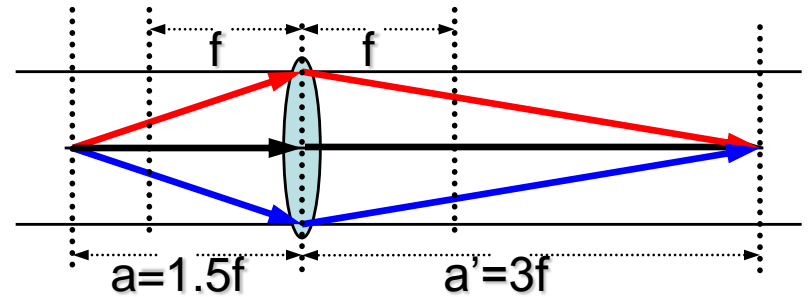
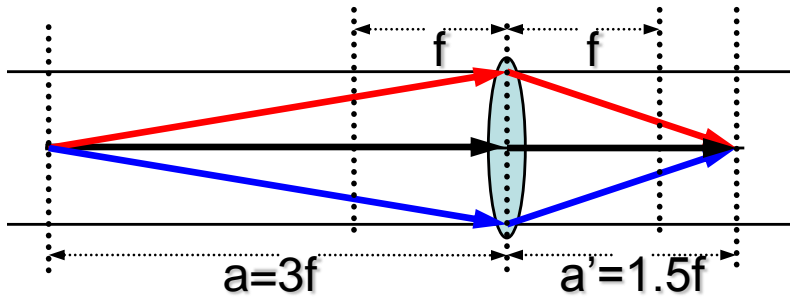
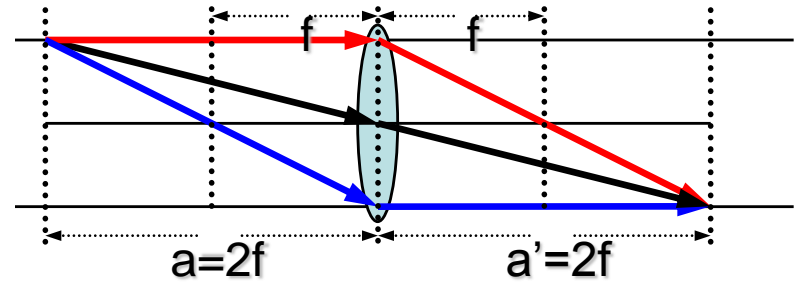
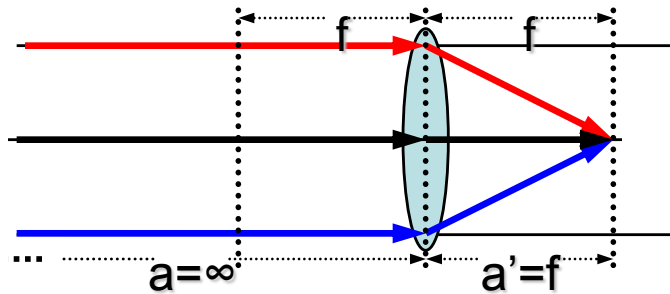
ガウスの結像公式

- 一点から来た光はレンズを通ると再び一点に集まる
- このとき
 - レンズ主平面から垂直距離(物体距離)で a 離れた一点から出た光
 - レンズ主平面から垂直距離(像距離)で a' 離れた一点に集まる
- とすると以下の関係が成り立つ

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

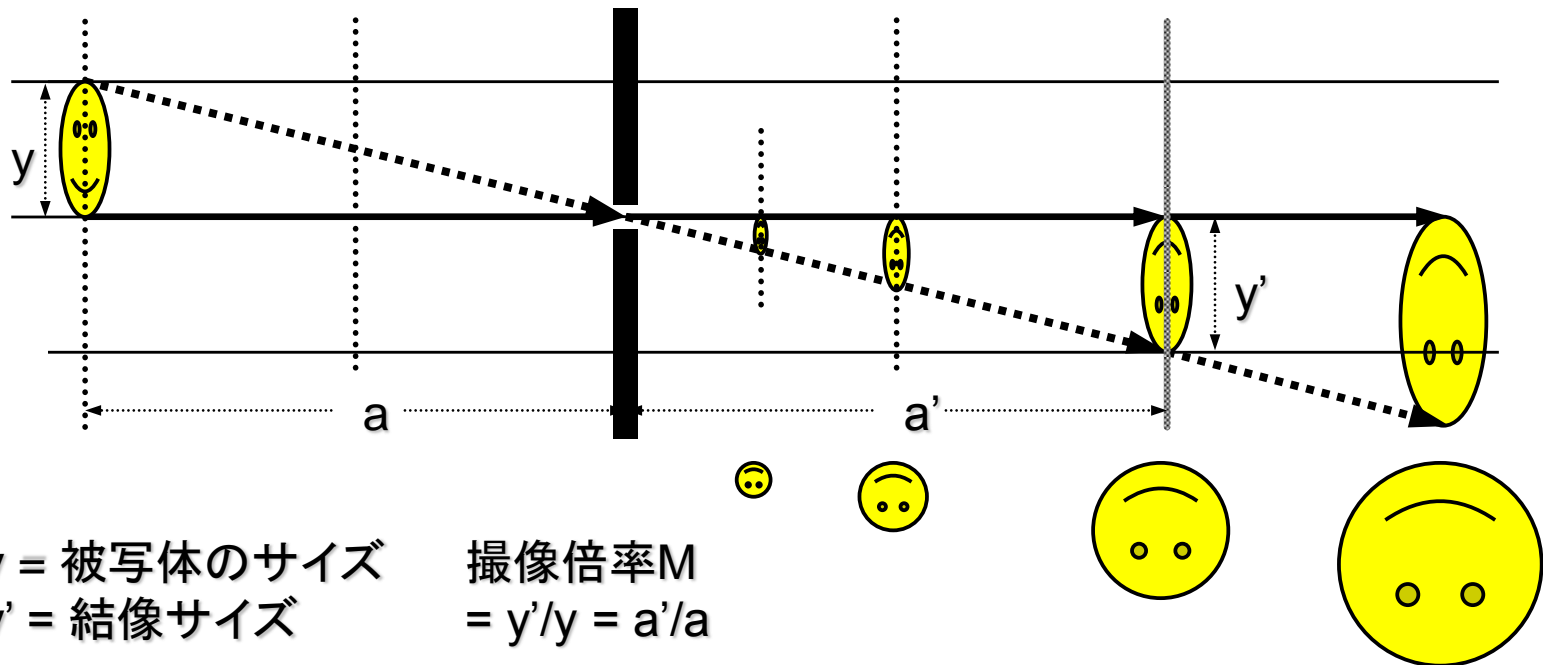


$1/f = 1/a + 1/a'$ の関係



- レンズを通して再び一点に集まる光
 - 集まった場所に実像を結ぶ(結像)
- $1/f = 1/a + 1/a'$ の関係から
 - $a' = af / (a - f)$
- レンズから a 離れた物体(被写体)
 - レンズから $af / (a - f)$ の距離(像距離)に結像する
- 結像位置にスクリーンやフィルムを配置
 - 像が映る
 - 撮影できる

- 実像のサイズはレンズからの距離に比例する
 - ピンホールカメラと同じ
- 撮像倍率
 - 被写体に対する実像の大きさの比率

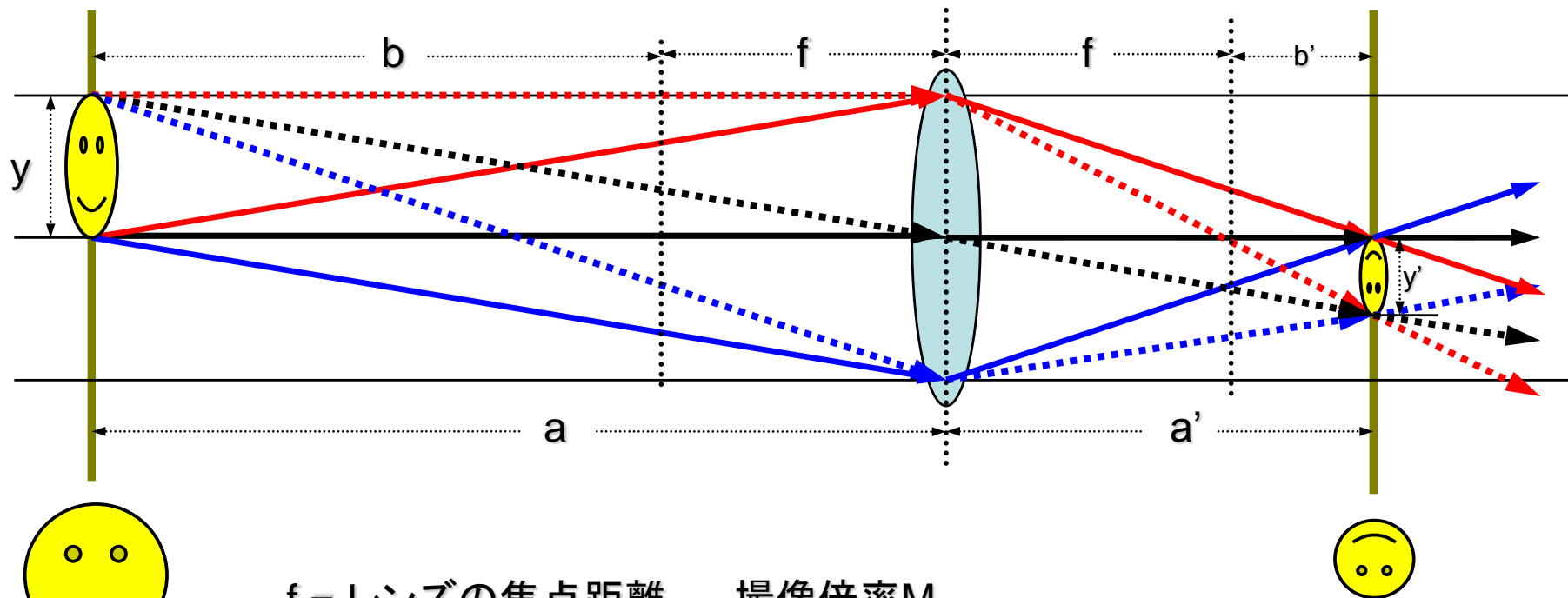


結像と撮像倍率(被写体が $3f$ の距離)

被写体位置

レンズ主平面

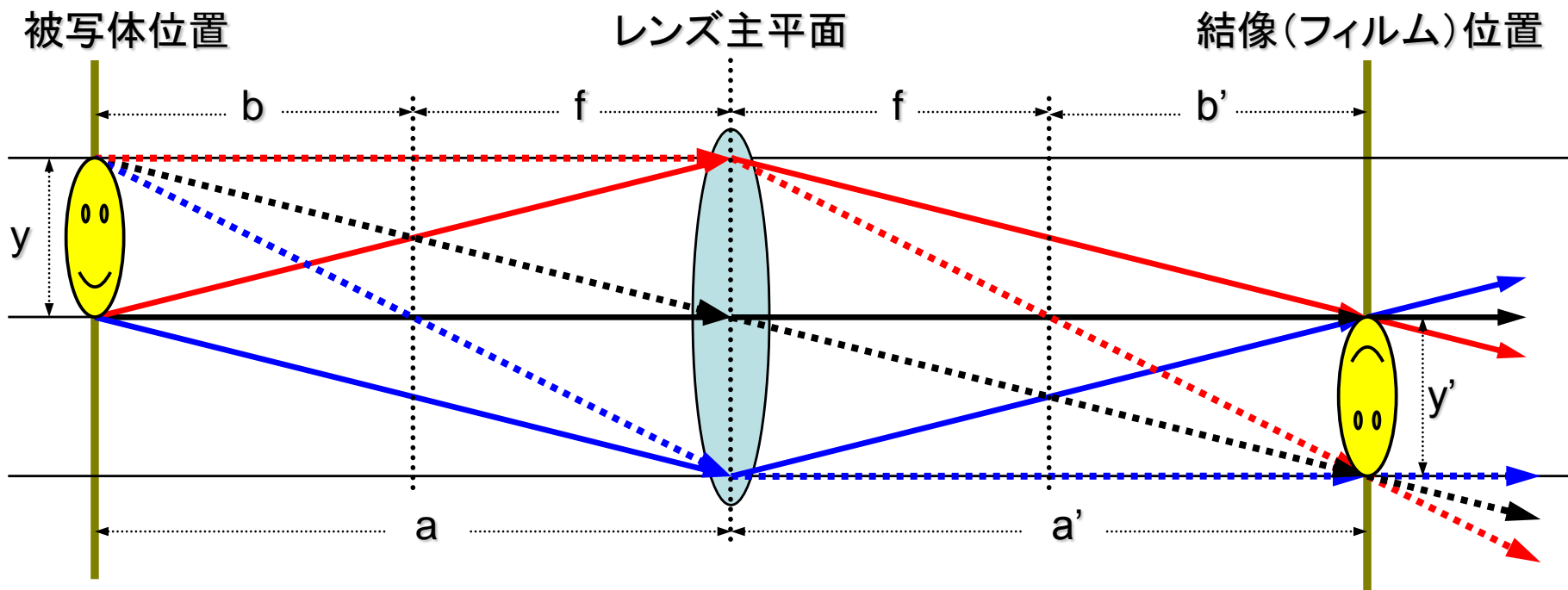
結像(フィルム)位置



f = レンズの焦点距離
 a = 被写体距離 = $3f$
 y = 被写体のサイズ
 y' = 結像サイズ
 $1/f = 1/a + 1/a'$
 $a' = af / (a - f) = 1.5f$

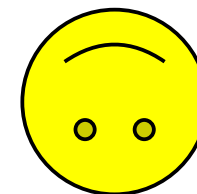
撮像倍率 M
 $= y'/y = a'/a = f/b = b'/f$
 $= f / (a - f) = a' / f - 1$
 $= 0.5$

結像と撮像倍率 (被写体が $2f$ の距離)



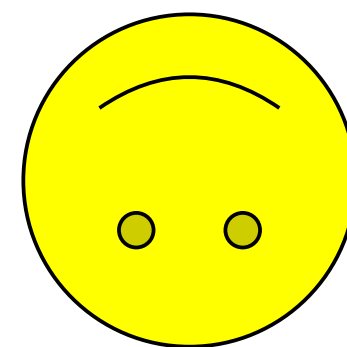
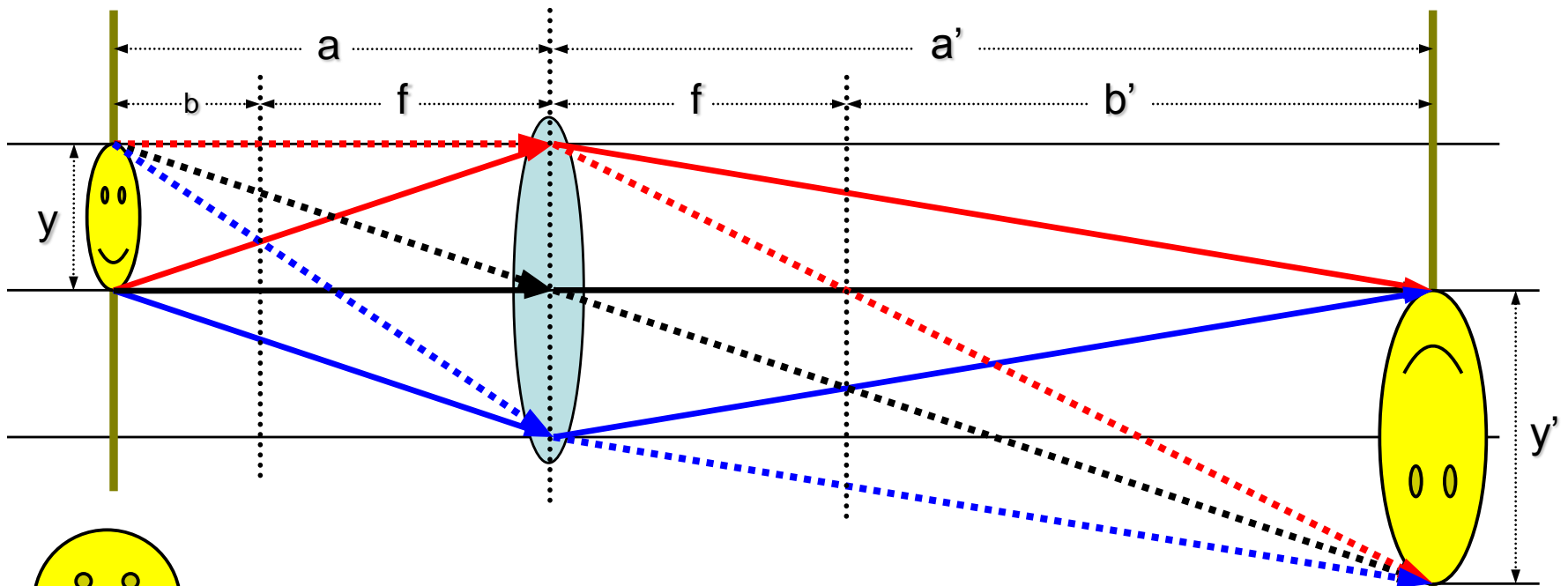
f = レンズの焦点距離
 a = 被写体距離 = $2f$
 y = 被写体のサイズ
 y' = 結像サイズ
 $1/f = 1/a + 1/a'$
 $a' = af / (a - f) = 2f$

撮像倍率 M
 $= y'/y = a'/a = f/b = b'/f$
 $= f / (a - f) = a' / f - 1$
 $= 1.0$



結像と撮像倍率(被写体が $1.5f$ の距離)

被写体位置 レンズ主平面 結像(フィルム)位置



f = レンズの焦点距離
 a = 被写体距離 = $1.5f$
 y = 被写体のサイズ
 y' = 結像サイズ
 $1/f = 1/a + 1/a'$
 $a' = af / (a - f) = 3f$

撮像倍率 M
 $= y'/y = a'/a = f/b = b'/f$
 $= f / (a - f) = a' / f - 1$
 $= 2.0$

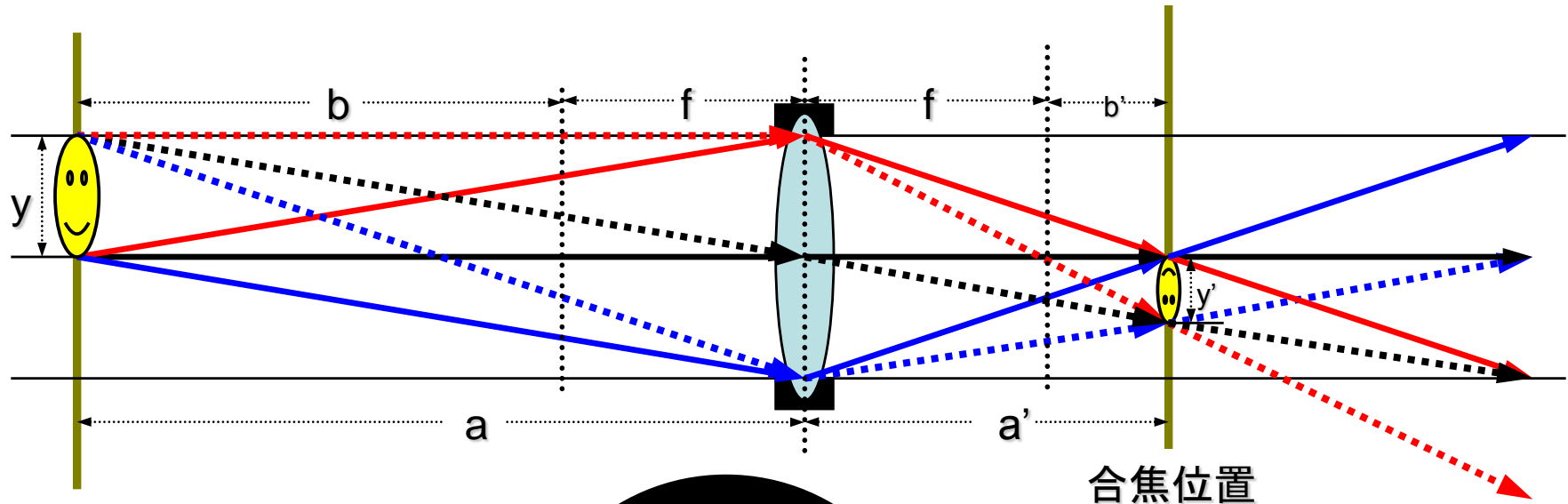
- フォーカスはレンズ特有の現象
 - ピンホールカメラでは全体的に少しぼやける
- フィルム位置で合焦するのは一定距離の被写体
 - 絞りを通った光束が一点に集中しきらない場所はボケる
 - 合焦位置がフィルム位置と一致しない深度の被写体
 - 合焦位置の前後にボケ
 - 合焦位置の前後に前ボケ／後ボケとして発生

- 開口絞りとは
 - フィルムに届く光の量を制限する枠
 - レンズの絞り羽根
 - ピンホールカメラの穴
 - 虫眼鏡の枠
 - 人の虹彩
 - etc.

開口絞りとボケ(被写体にフォーカス)

f の 3 倍の距離の被写体にフォーカス

フィルム位置



合焦位置

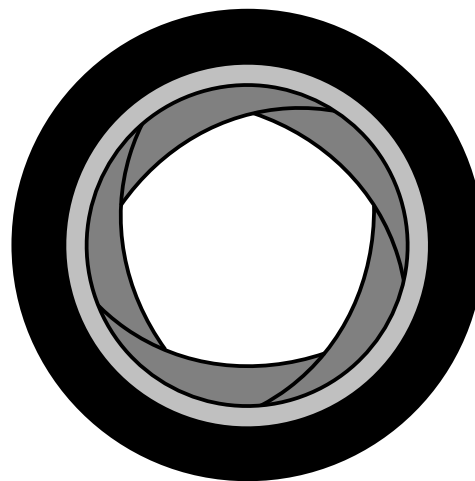


撮像倍率M

$$= y'/y = a'/a = f/b = b'/f$$

$$= f / (a - f)$$

$$= 0.5$$

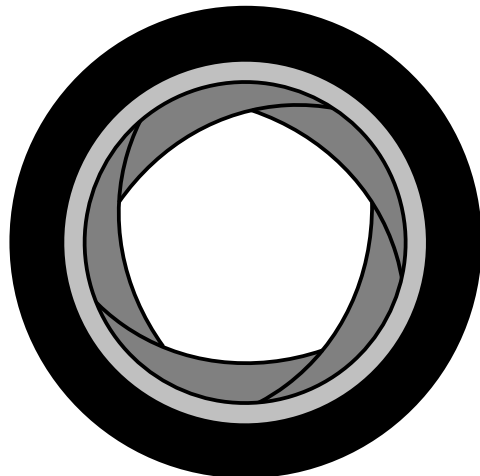
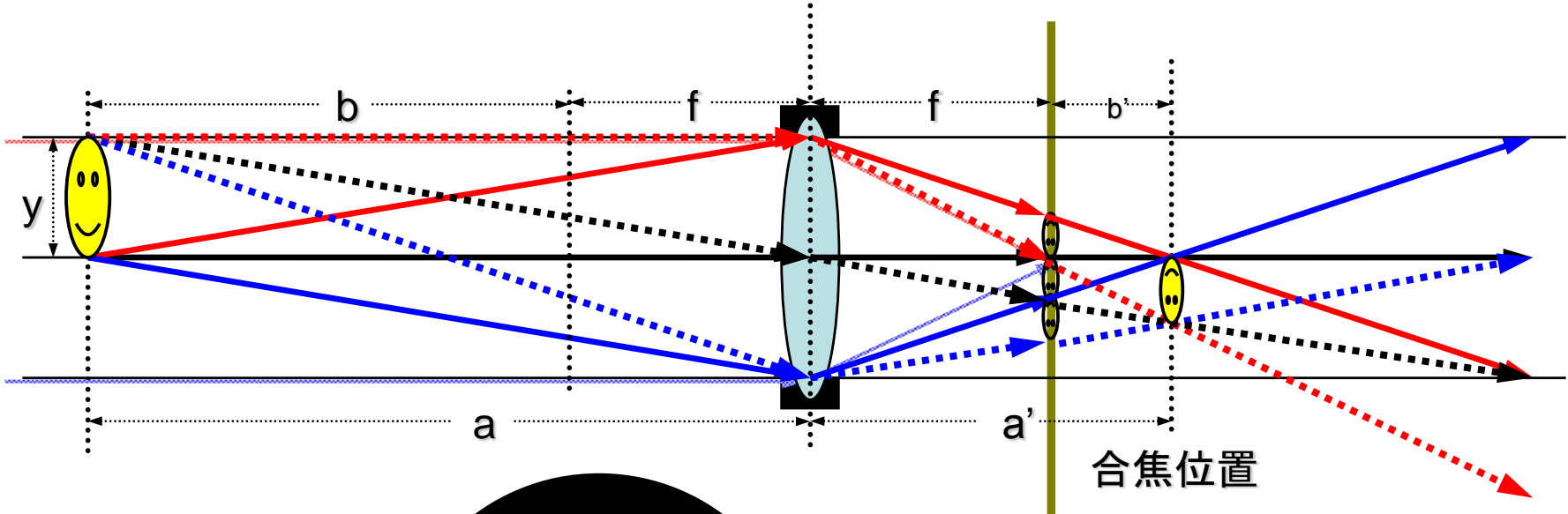


レンズの絞り

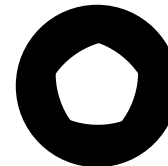
開口絞りと前ボケ (無限遠にフォーカス)

無限遠にフォーカス

フィルム位置

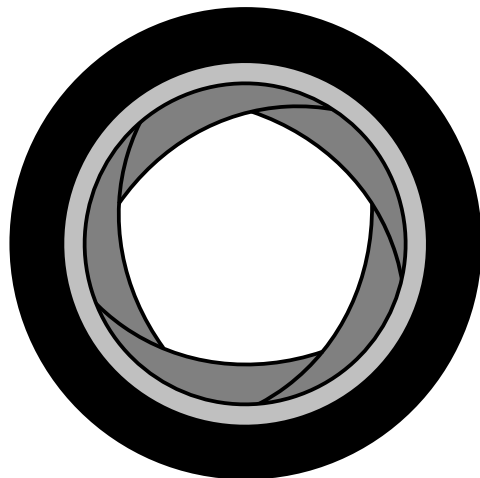
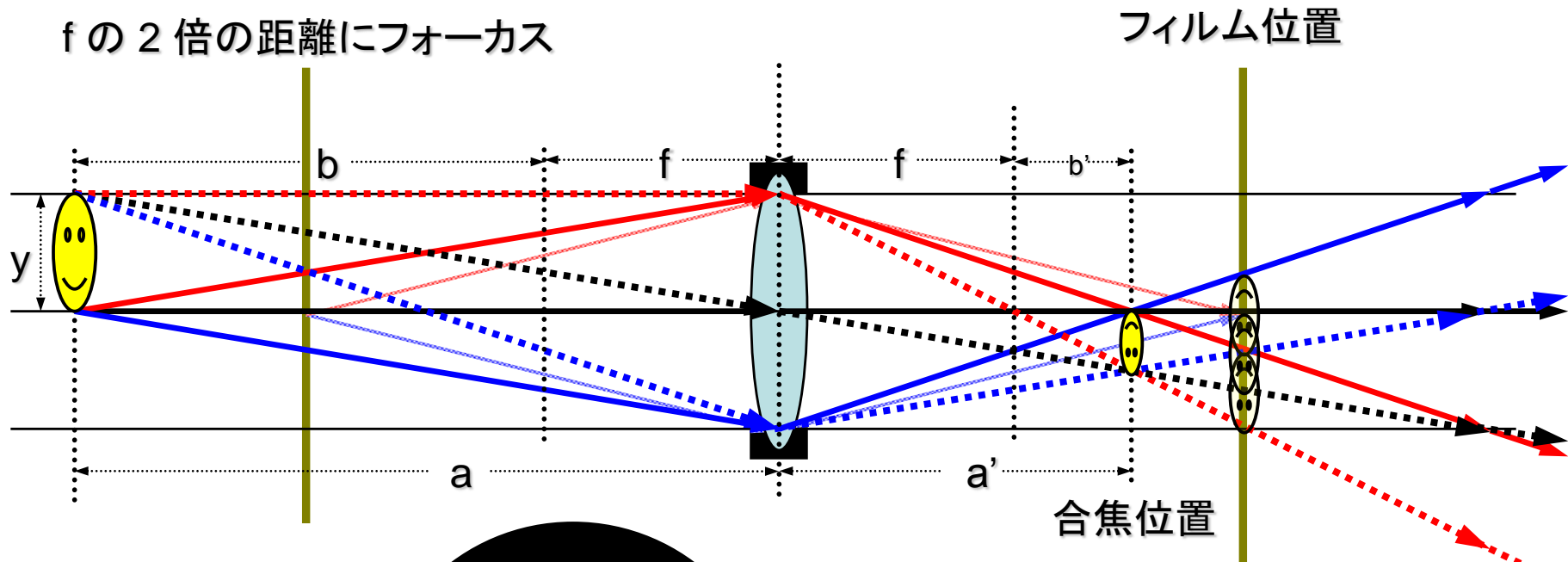


レンズの絞り

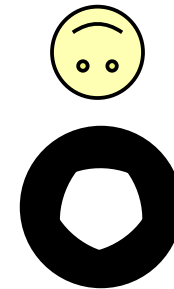


前ボケ

開口絞りと後ボケ(近くにフォーカス)

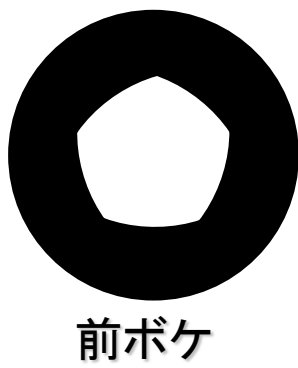
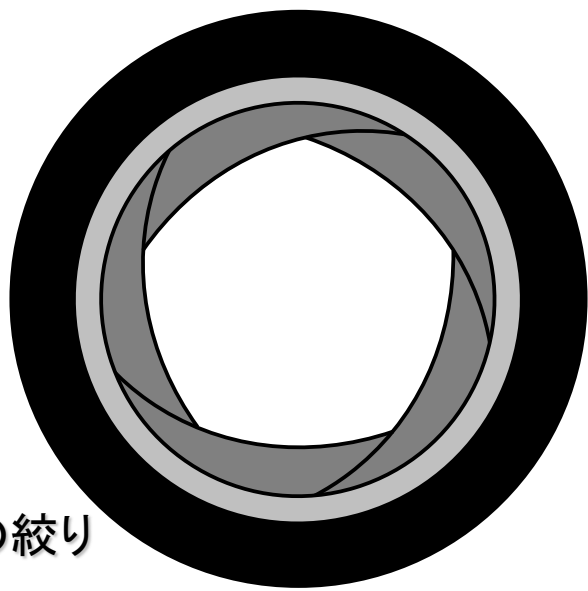
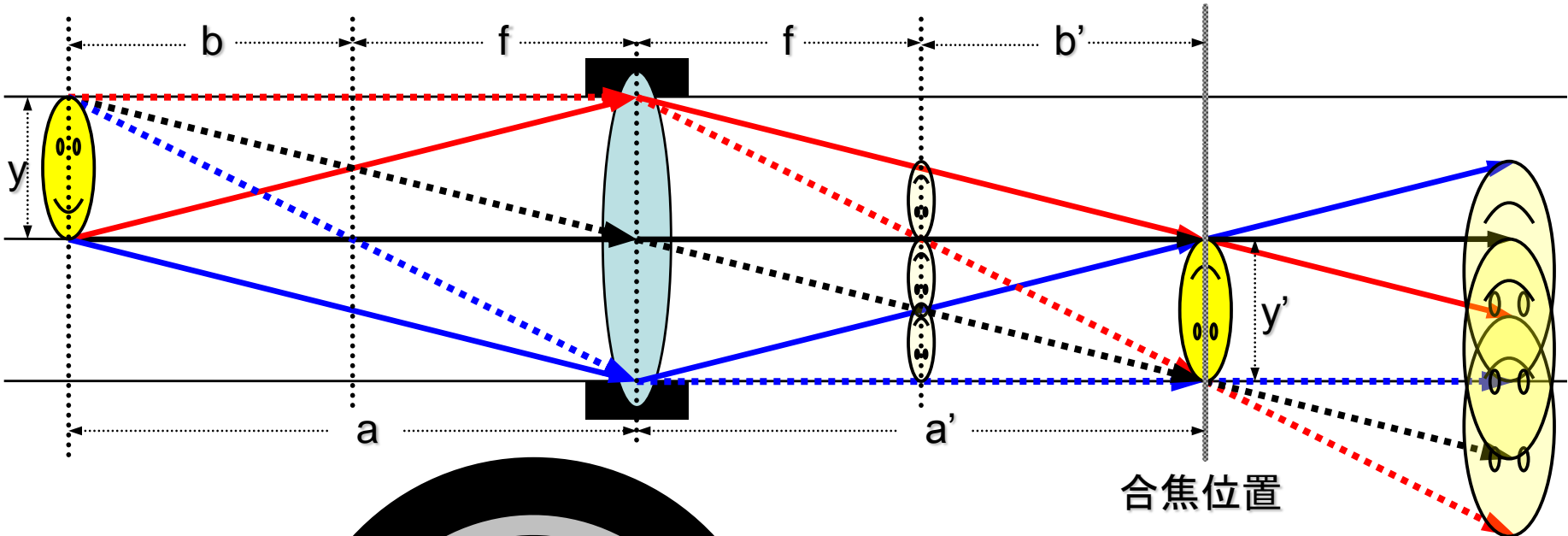


レンズの絞り

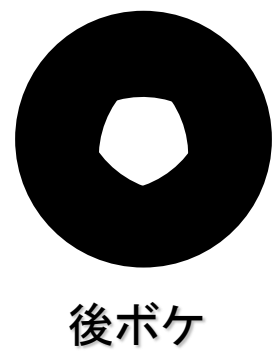
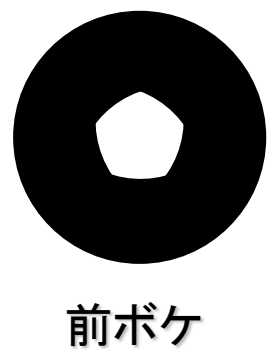
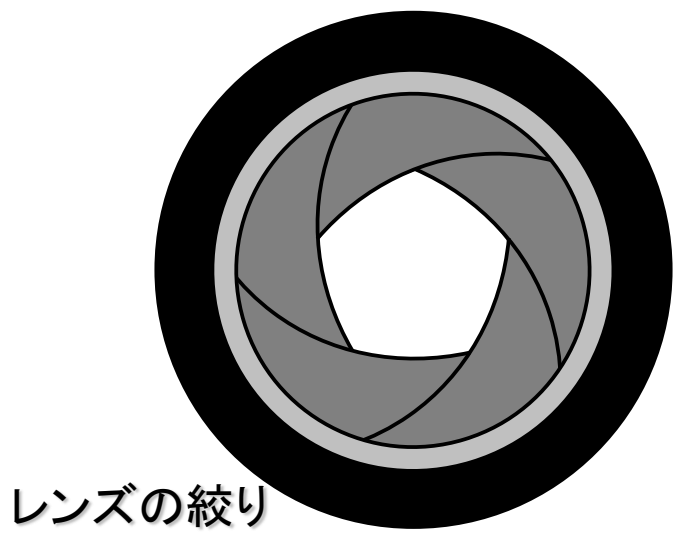
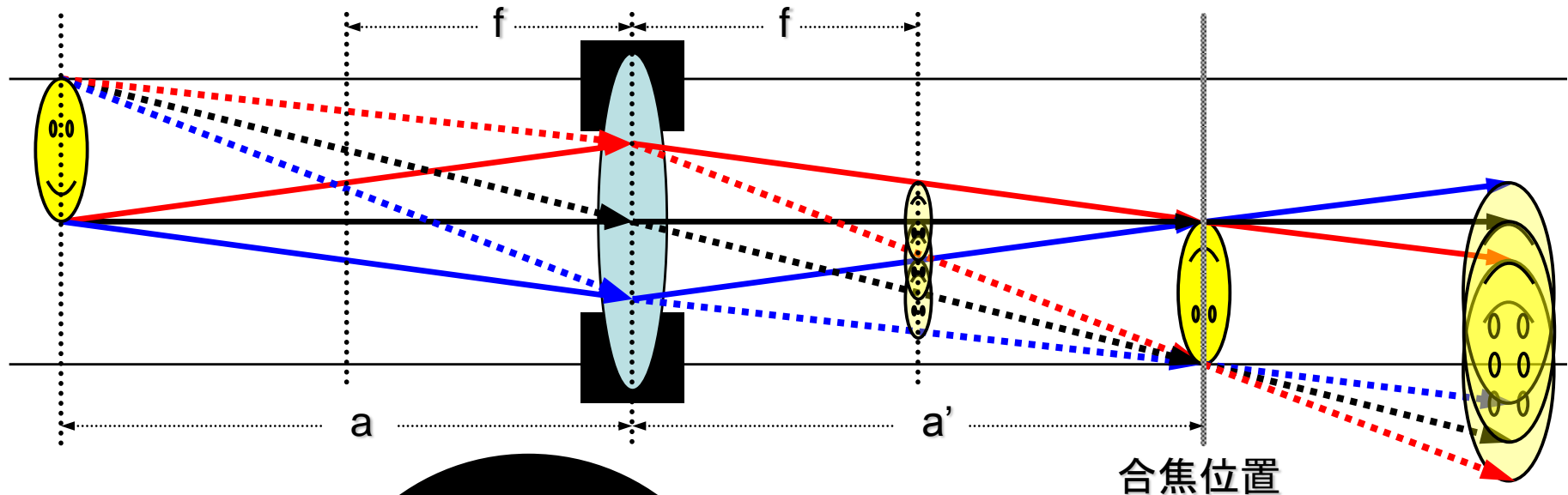


後ボケ

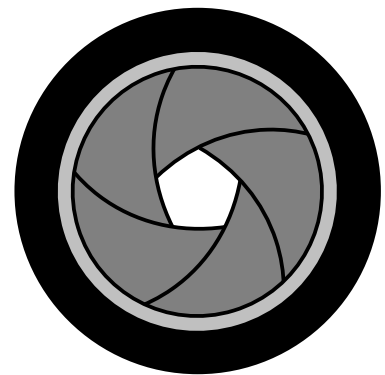
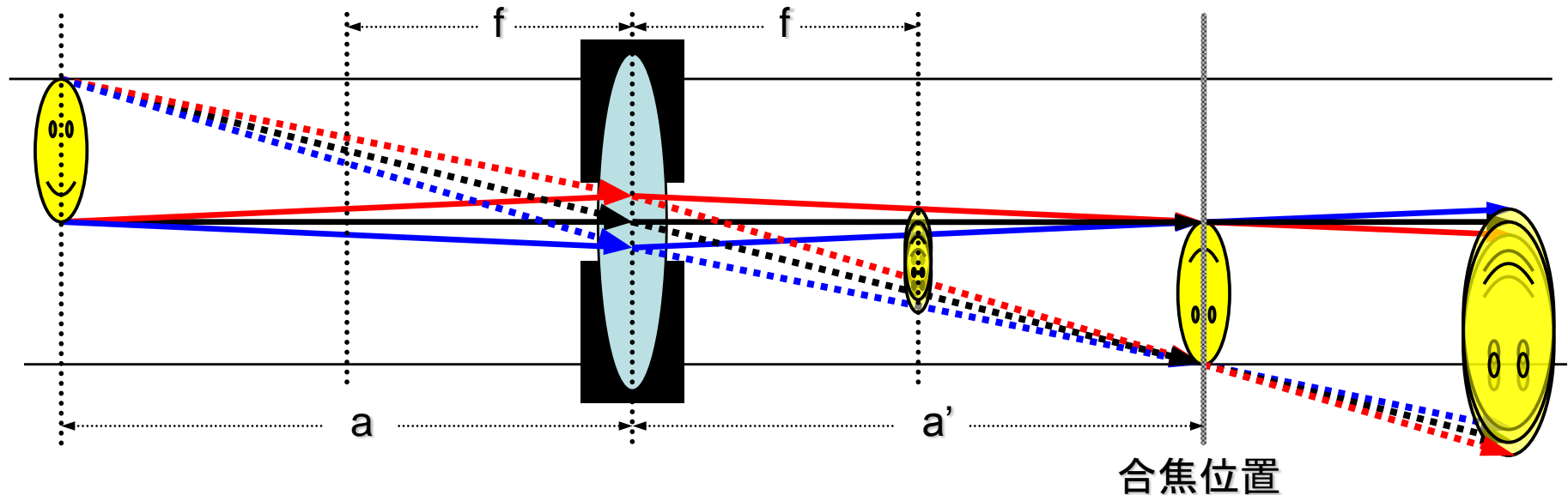
絞りの大きさとボケ



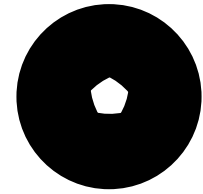
絞りの大きさとボケ



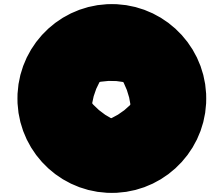
絞りの大きさとボケ



レンズの絞り

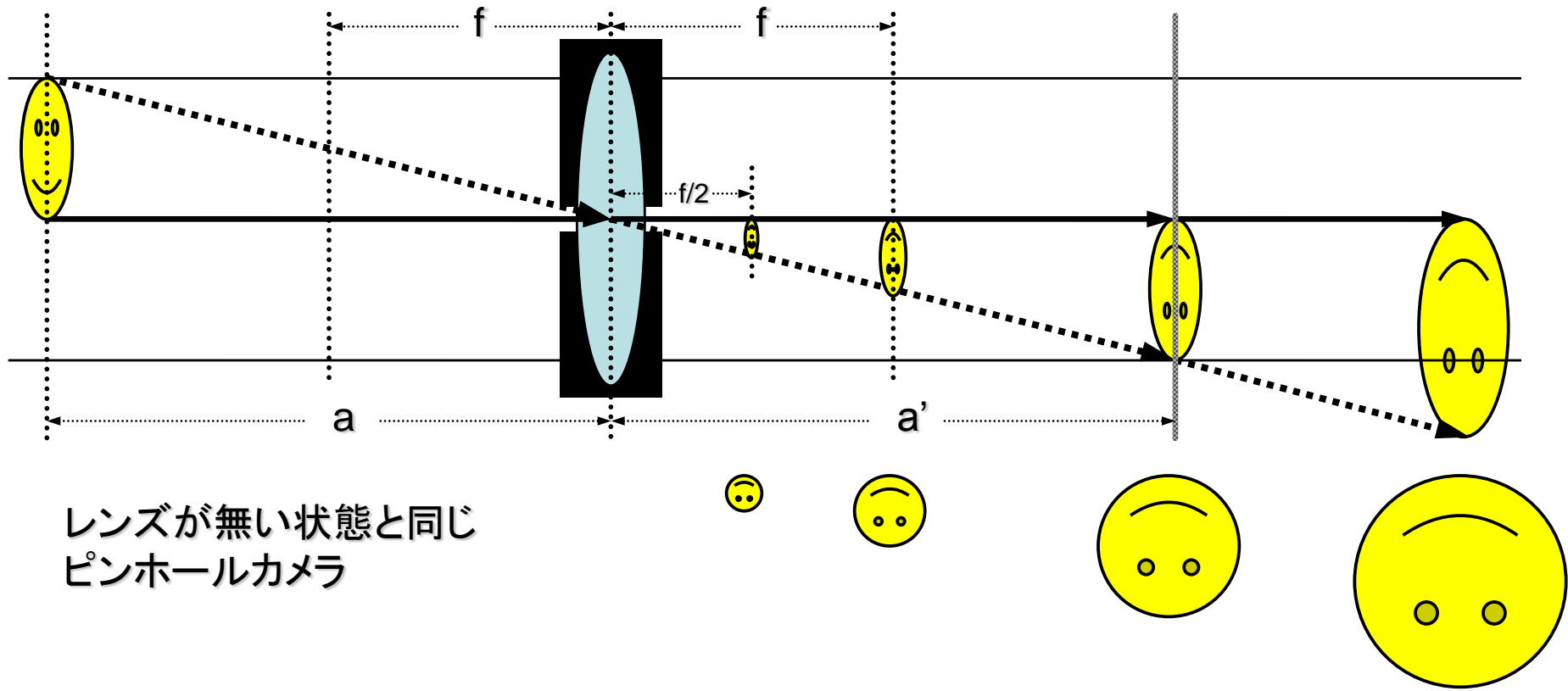


前ボケ



後ボケ

絞りの大きさとボケ



- 口径比 (F値／Fナンバー)
 - 実像の明るさの指標
- 考え方
 - 開口絞りが大きいほど明るい
 - 開口面積に比例
 - 有効径の2乗に比例
 - 結像のサイズはレンズ主平面からの垂直距離に比例
 - 面積は距離の2乗に比例
 - 明るさは距離の2乗に反比例
 - 実像までの距離と絞り口径の比率で明るさが決まる

- 焦点距離 f と絞り有効径 D の比
 - $F = f / D$
 - D は絞りの有効径
 - 明るさはF値の2乗に反比例
 - 面積は2乗に比例するため
 - F値が2倍になると明るさは $\frac{1}{4}$ となる
- $f/4$ などといった表記
 - $f/4$ は絞り有効径が焦点距離 f の $\frac{1}{4}$ であるとの意味
- 無限遠にフォーカスしていると仮定された明るさ
 - 常に焦点距離にフィルムを置くと仮定している

エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

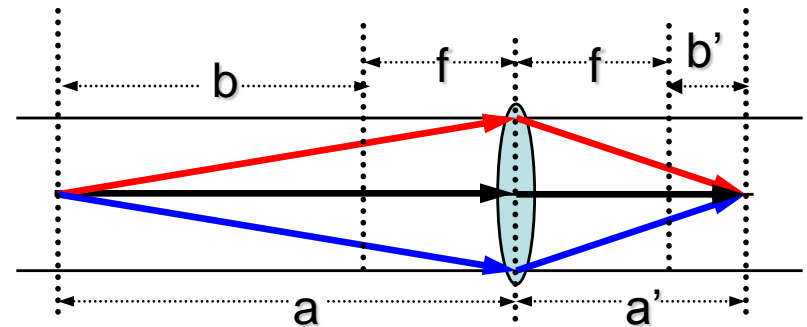
CEDEC

CESA Developers Conference

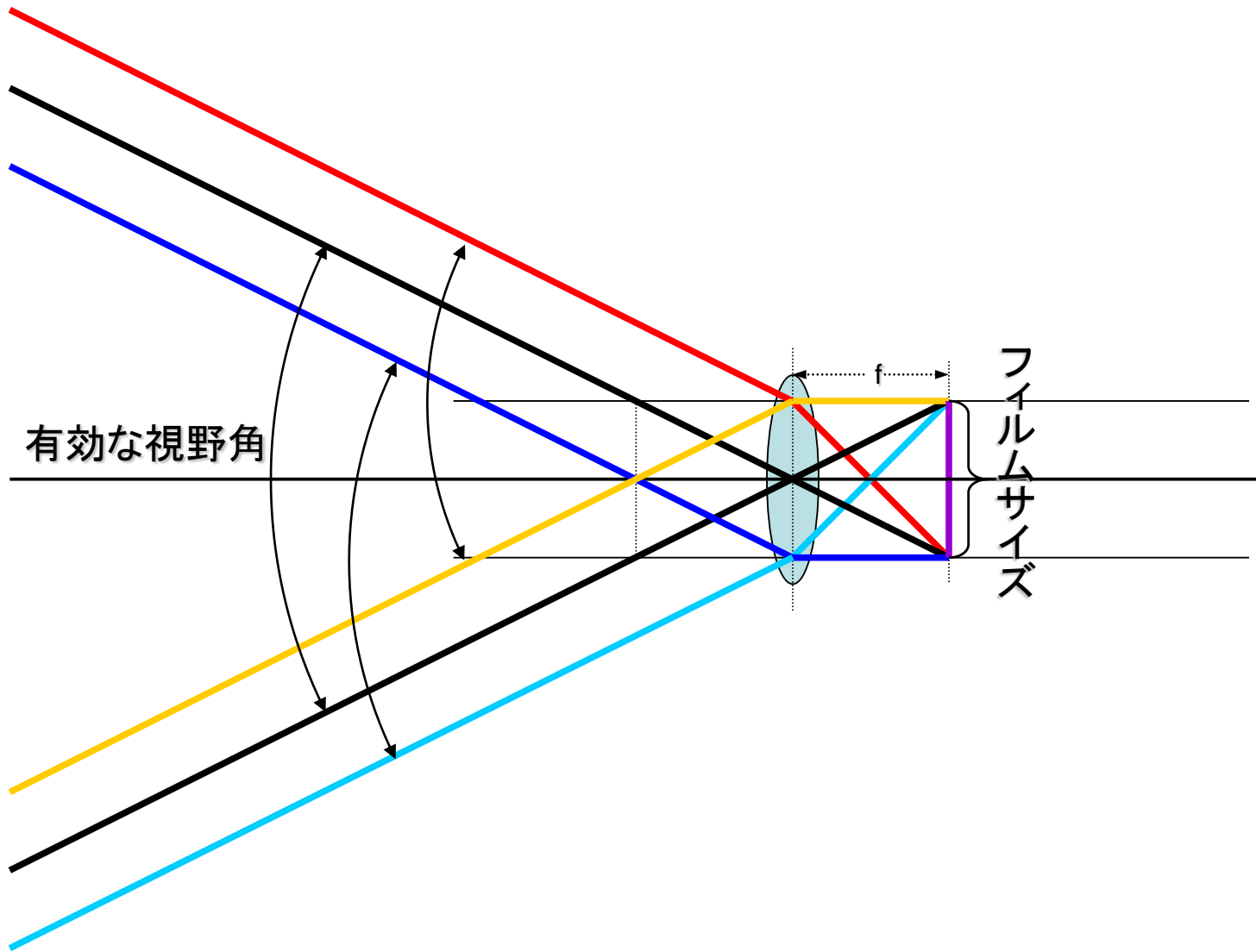
2010

画角と実効F値

- 近距離フォーカス時は結像がフィルムから遠い
 - 像が拡大され面積も広くなる
 - その分の面積比に反比例して暗くなる
- 撮像倍率によって暗くなる効果を考慮したF値
 - 大雑把に言えば近くにフォーカスすると暗くなるということ
 - $F_e = (1 + M) F$
 - $F_e = (a' / f) F$
 - M は撮像倍率
 - $M = a' / a = f / b = b' / f$
 - $M = f / (a - f) = a' / f - 1$



焦点距離とフィルムサイズと画角



- 一般的な画角の説明

- フィルムサイズと焦点距離の比率で決まる

- 無限遠にフォーカスしていると仮定している
 - 焦点距離にフィルムを置いている

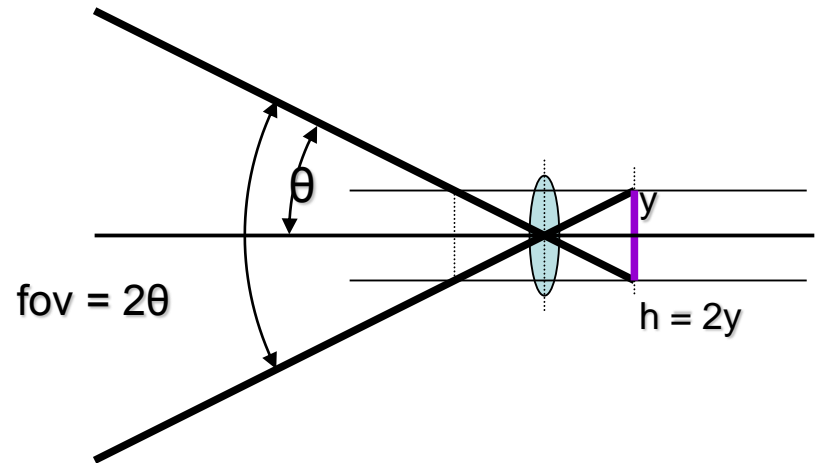
- $\tan(\theta) = y / f$

- $f = y / \tan(\theta)$

- $\text{fov} = \text{atan}(h / 2f) * 2$

- $f = h / (\tan(\text{fov} / 2) * 2)$

- fov は画角
 - θ は半画角
 - h はフィルムサイズ
 - y はフィルムサイズの半分



- 慣習的に35mmフィルムが基準とされることが多い

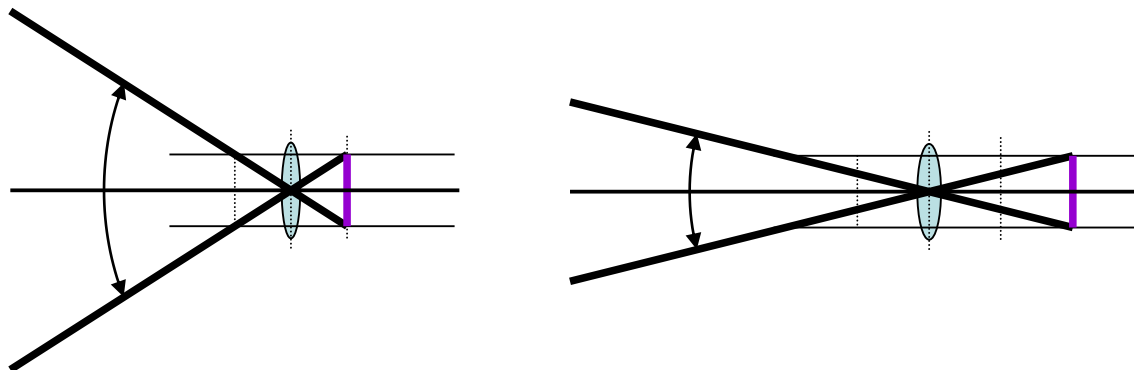
- 無限遠フォーカス前提なら焦点距離だけで画角が決まる

- 焦点距離 = 画角のような扱いとなっている

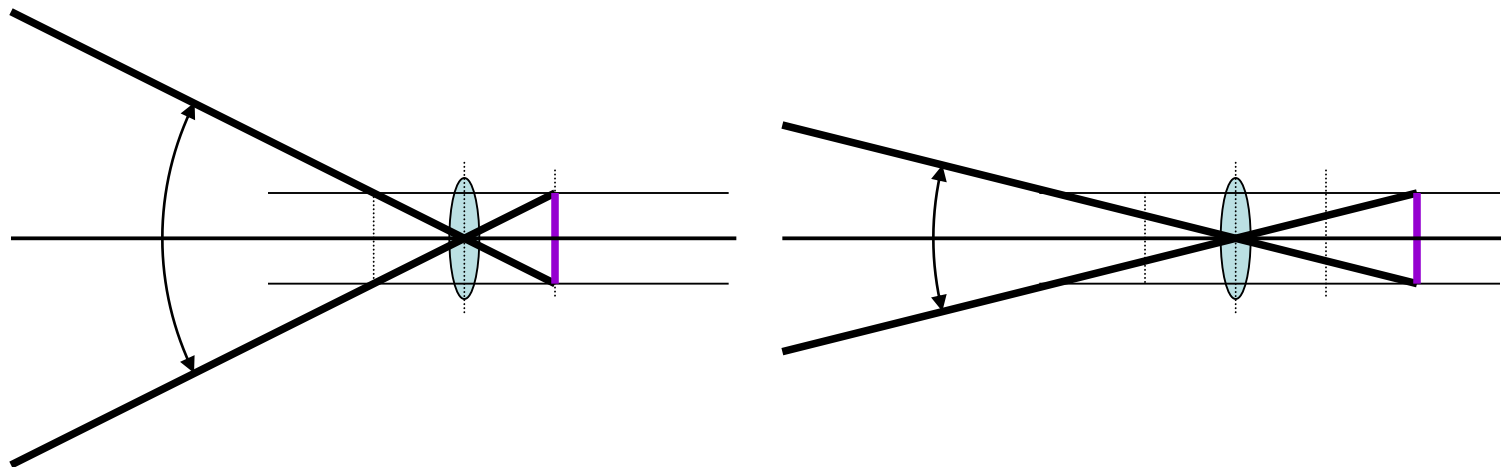
- 一般的な画角の説明
 - 無限遠にフォーカスしていると仮定している
 - 焦点距離にフィルムを置くことを前提としている
 - この仮定が非常に重要な前提となっている
 - あまり明記されないことが多い

- 一般には焦点距離＝画角のような扱いとなっている
 - 必ずしも間違いではないが誤解を招きやすい
 - 近接撮影(特にマクロ)では条件が大きく異なる
- 厳密には焦点距離は画角とは無関係
 - ピンホールカメラを考えると良い
 - 焦点距離は無限大
 - フォーカス距離という概念も存在しない
 - それでも実効F値と画角は存在し、計算できる
 - しかしF値は計算できないことに注意
 - » $F = f / D$
 - » ピンホールでは f は無限大でありF値は計算できない

- そもそも実効F値は撮像倍率を考慮したF値
 - フィルムの距離が離れることにより像が拡大される
 - 拡大された面積比による明るさの減衰を考慮した値
- 本来実効F値と画角は密接な関係にある
 - 像が拡大されるということは画角が狭くなるということ
 - 実効F値が変化するなら必ず画角も変化する
 - 画角が変化するなら必ず実効F値も変化する

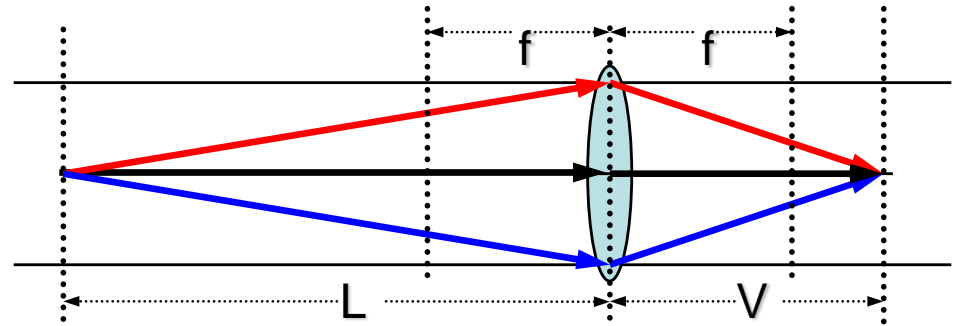


- 左は無遠焦点
- 右は等倍マクロ (焦点距離の2倍にフォーカス)
 - 撮像倍率が1.0倍 (等倍) 以上をマクロとよぶ
 - 一般には0.5倍程度以上
- 焦点距離 f と絞り有効径 D は変わらない
 - F値 (f/D) も変わらないことに注意
- しかし画角と実効F値はともに変化している



- 無限遠フォーカス限定
 - 画角
 - 焦点距離とフィルムサイズで確定
 - F値および実効F値
 - 焦点距離と絞り有効径で確定
- 無限遠以外も考慮した厳密な計算
 - 画角
 - 主面からフィルムまでの距離とフィルムサイズで確定
 - 実効F値
 - 主面からフィルムまでの距離と絞り有効径で確定
- 違い
 - 焦点距離の代わりにフィルムまでの距離を使うこと
 - フィルムまでの距離を「**実効焦点距離**」とよぶこともある

- 実効焦点距離V
 - レンズの結像公式から
 - $V = Lf / (L - f)$
 - L はフォーカス距離



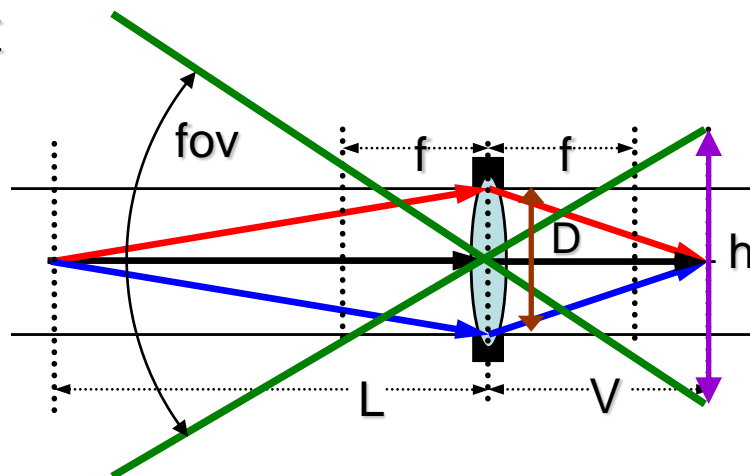
- フィルム距離としてのVだけから考えることも可能
 - Vさえ判れば画角や実効F値は計算できる
 - ピンホールでは焦点距離やフォーカス距離が存在しない
 - それでも画角と実効F値は計算できる
 - レンズがある場合Vにフィルムを置くとLにフォーカスする
 - $L = Vf / (V - f)$

- 画角

- $fov = \text{atan}(h / 2V) * 2$
- $V = h / (\tan(fov / 2) * 2)$
- レンズが存在する場合のみ有効な計算
 - $fov = \text{atan}(h (L - f) / 2Lf) * 2$
 - $f = (Lh / 2) / (\tan(fov / 2) * L + h / 2)$
- 無限遠フォーカス限定時
 - $fov = \text{atan}(h / 2f) * 2$
 - $f = h / (\tan(fov / 2) * 2)$

- 実効F値

- $Fe = V / D$
- レンズが存在する場合のみ有効な計算
 - $Fe = (1 + M) F$
 - $Fe = (V / f) F$
 - $V = Lf / (L - f)$
 - $L = Vf / (V - f)$
- 無限遠フォーカス限定時の実効F値(つまりF値)は
 - $F = f / D$



撮像倍率

$$M = V / L$$

$$M = f / (L - f) = V / f - 1$$

f25mm (広角～超広角)



f50mm (標準)



f100mm (中望遠)



f200mm (望遠)



f400mm (超望遠)



無限遠を仮定すると何が問題か？

- 画角から焦点距離を計算する場合
 - 無限遠を仮定した計算だと焦点距離に誤差が発生
 - 厳密な焦点距離よりも大きい値となる
 - 等倍マクロの場合2倍の差が発生
 - 焦点距離を基準とする計算に影響
- 焦点距離から画角を計算した場合
 - 無限遠を仮定した計算だと画角に誤差が発生
 - 正しい画角よりも広角となる

- 焦点距離に基づく計算すべてに影響する
 - $F = f / D$
 - 絞り有効口径を基準にするとF値が本来より小さくなる
 - $D = f / F$
 - F値を基準にすると絞り有効口径が本来より小さくなる
- 光学パラメタが内部的に矛盾をはらんでしまう
 - 何を基準に計算するかで結果が異なる
 - 被写界深度がおかしくなる
 - 実効F値などの明るさがおかしくなる
 - 特にマクロ時は極端に誤差が大きくなる

エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

CEDEC

CESA Developers Conference

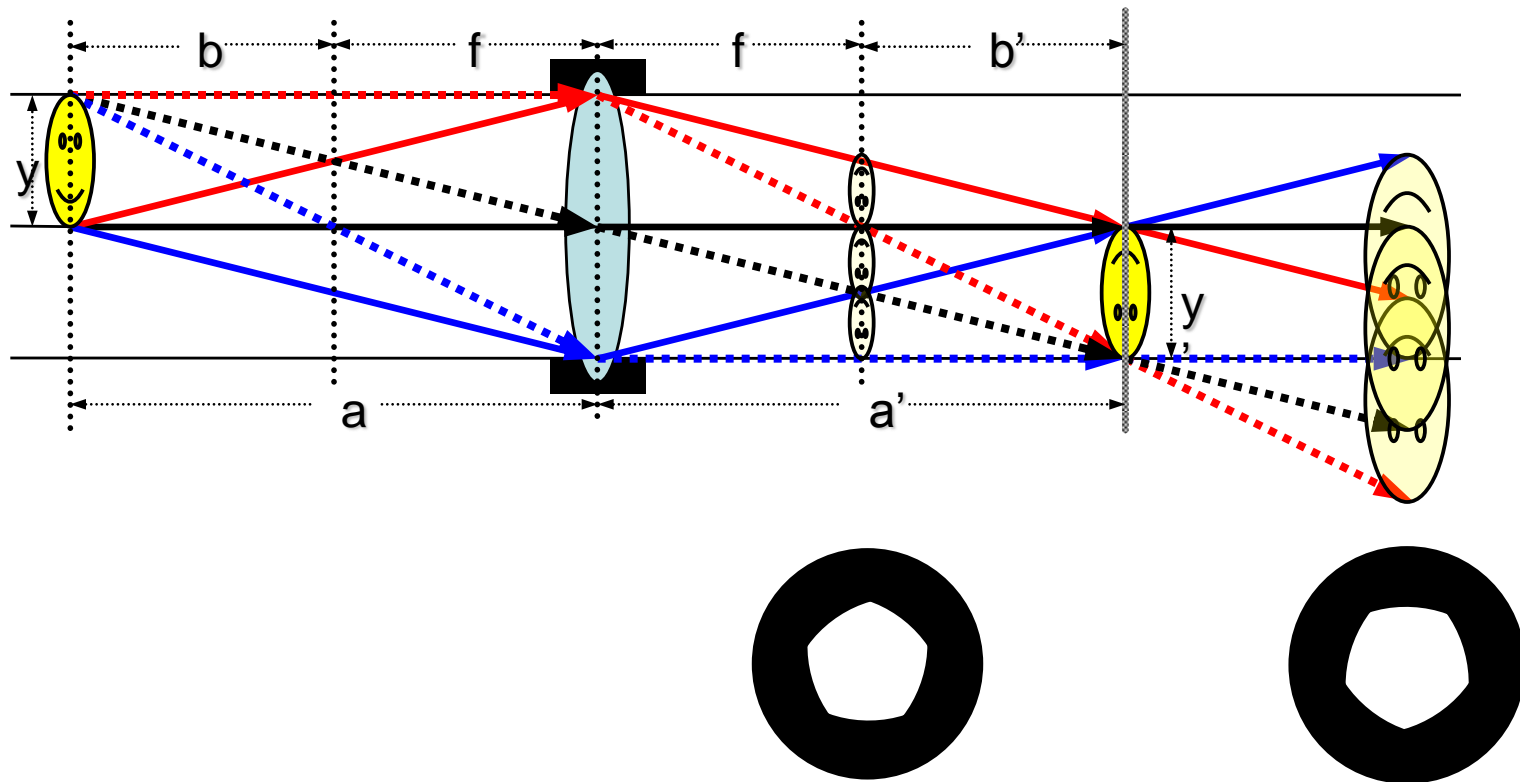
2010

錯乱円

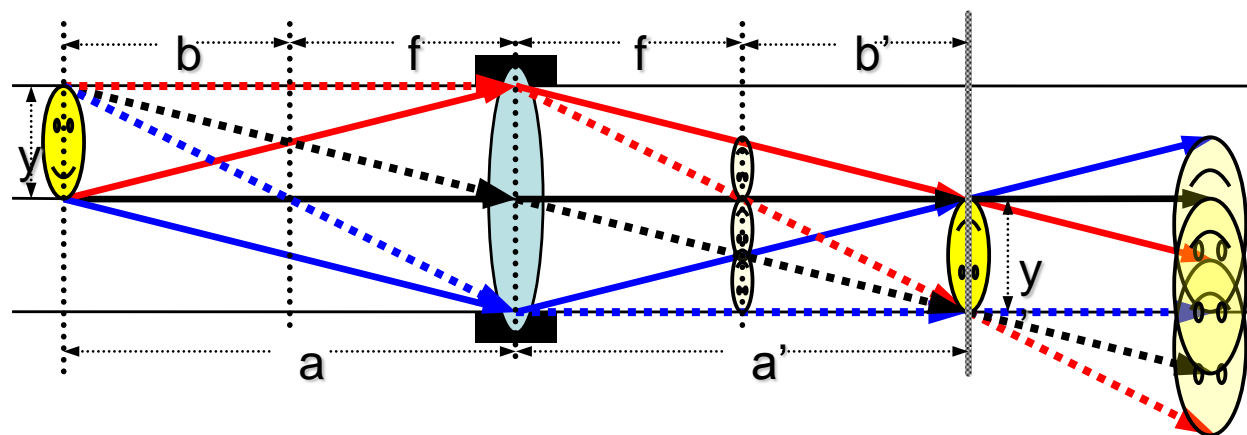
Circle of Confusion

錯乱円 (Circle of Confusion)

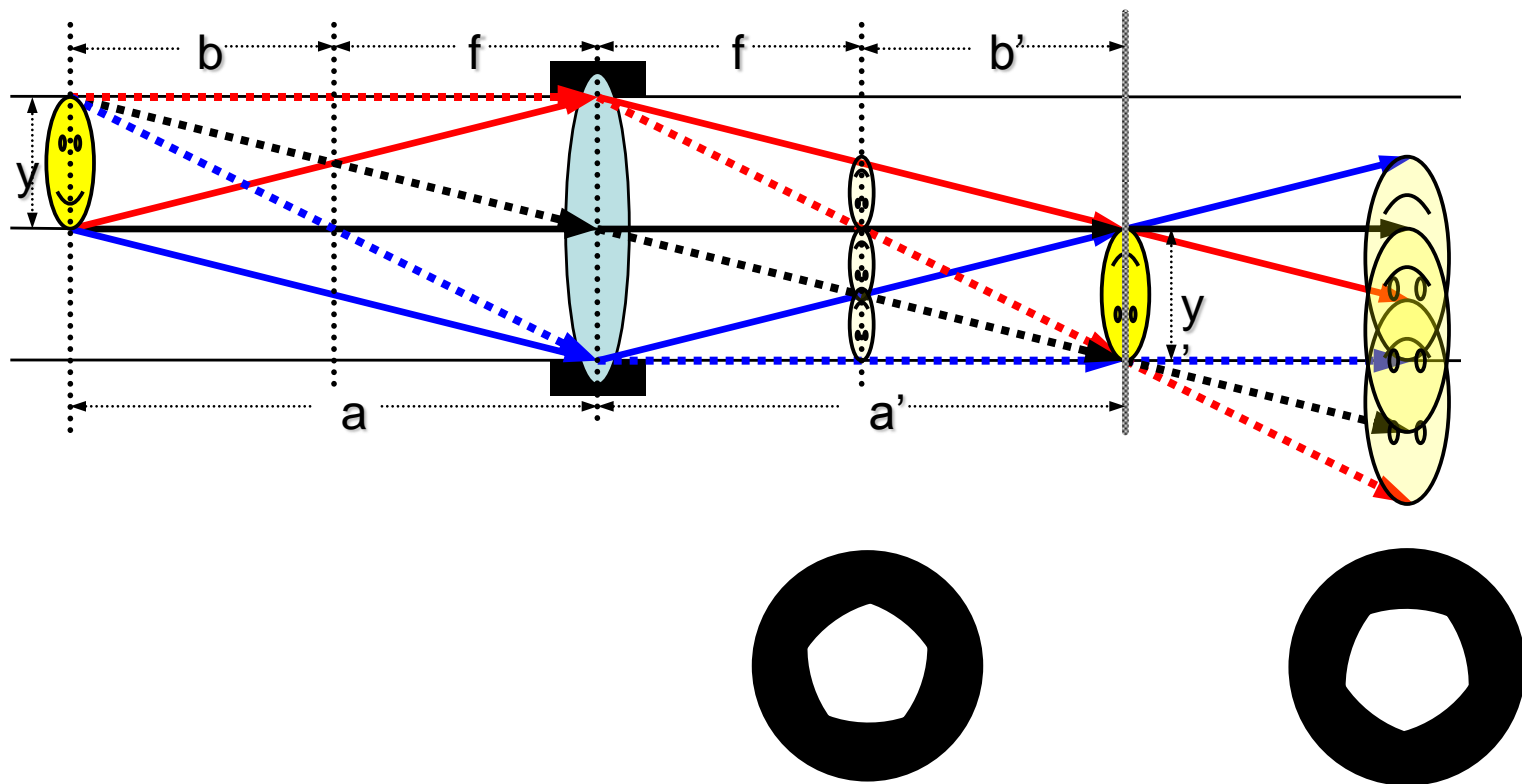
- 被写界深度エフェクトを実装する場合
 - 特定の深度に対する錯乱円径が必要



- aの距離のフィルム上での錯乱円径
 - Lにフォーカス時
- 「フィルム位置」と「目標深度の合焦位置」の差分に比例
 - レンズ主平面からのフィルム距離: $V = Lf / (L - f)$
 - レンズ主平面からの目標合焦距離: $a' = af / (a - f)$
 - $V - a' = Lf / (L - f) - af / (a - f)$ に比例
 - この場合前ボケは負の値となる
- 絞り有効径に比例
 - D に比例
- $|V - a'|$ (フィルム位置と合焦距離との差) が a' のときに錯乱円径が D となる
 - $a' = af / (a - f)$ に反比例
 - 目標深度aの像距離 a'



- 物理的な錯乱円径（前ボケは負の値となる）
 - $CoC(a) = (V - a') D / a'$
 - $CoC(a) = (Lf / (L - f) - af / (a - f)) D / (af / (a - f))$



- 無限遠の物理的な錯乱円径
 - $\text{CoC}(\infty) = VD / L$
 - $\text{CoC}(\infty) = V^2 / LFe$
 - $\text{CoC}(\infty) = FeD^2 / L$
 - $\text{CoC}(\infty) = fD / (L - f)$
 - $\text{CoC}(\infty) = f^2 / (L - f)F$
 - $\text{CoC}(\infty) = FD^2 / (L - f)$
 - $\text{CoC}(\infty) = MD$

- aの距離の物理的な錯乱円径
 - $\text{CoC}(a) = (V - a') D / a'$
 - $\text{CoC}(a) = (Lf / (L - f) - af / (a - f)) D / (af / (a - f))$
 - $\text{CoC}(a) = \text{CoC}(\infty) * (a - L) / a$
- いろいろな変形
 - $\text{CoC}(a) = (V - a') (a - f) D / af$
 - $\text{CoC}(a) = (V - a') (a - f) / aF$
 - $\text{CoC}(a) = (Lf / (L - f) - af / (a - f)) (a - f) D / af$
 - $\text{CoC}(a) = (Lf / (L - f) - af / (a - f)) (a - f) / aF$
 - $\text{CoC}(a) = fD / (L - f) * (a - L) / a$
 - $\text{CoC}(a) = MD * (a - L) / a$
 - $\text{CoC}(a) = (V - f) / f - VD / a$
 - $\text{CoC}(a) = (aV - af - fV)D / af$
 - $\text{CoC}(a) = (aV - af - fV) / aF$
 - $\text{CoC}(a) = VD / L * (a - L) / a$

- フィルムのサイズに占める比率(画面上の大きさ)は
 - 錯乱円径の物理サイズをフィルムサイズで除算
 - $\text{CoC}(a) / h$
 - h はフィルム(イメージセンサ)のサイズ
 - いろいろ変形
 - $(V - a') D / a'h$
 - $(V - a') (a - f) D / afh$
 - $(V - a') (a - f) / aFh$
 - $(Lf / (L - f) - af / (a - f)) (a - f) D / afh$
 - $(Lf / (L - f) - af / (a - f)) (a - f) / aFh$
 - $fD / (L - f) * (a - L) / ah$
 - $MD * (a - L) / ah$
 - $(V - f) / fh - VD / ah$
 - $(aV - af - fV)D / afh$
 - $(aV - af - fV) / aFh$
 - $VD / L * (a - L) / ah$
- これに画面解像度を乗算すればピクセル数が求まる

- フィルムのサイズに占める比率
 - $\text{CoC}(\infty) / h$
 - いろいろ変形
 - VD / Lh
 - $V^2 / LFeh$
 - FeD^2 / Lh
 - $fD / (L - f)h$
 - $f^2 / (L - f)Fh$
 - $FD^2 / (L - f)h$
 - MD / h

- 近くにフォーカスするほど被写界深度が浅くなる
 - マクロ撮影はボケやすい
 - ミニチュアなどを接写で撮影するとボケが大きい
 - ミニチュアはボケが大きいという一般的なイメージがある
 - ボケが大きいとミニチュアのように見える
- 焦点距離が長いほど被写界深度が浅くなる
 - 広角あるいはイメージセンサが小さい方が深くなる
- 画角やF値が同じ場合
 - ボケの大きさはほぼイメージセンサのサイズに比例する
 - コンパクトデジカメよりも一眼レフの方がボケが大きい

- 画角を基準に焦点距離を求める場合
 - かならず正確な焦点距離を計算すること
 - 正しい焦点距離の求め方
 - $f = (Lh / 2) / (\tan(\text{fov} / 2) * L + h / 2)$
 - L はフォーカス距離
 - h はイメージセンササイズ
 - 誤った焦点距離の求め方
 - $f = h / (\tan(\text{fov} / 2) * 2)$
 - 一般にはこちらの方がよく知られているので要注意！
 - 等倍マクロでは焦点距離が2倍に計算されてしまう

誤った焦点距離から計算すると？

- 誤った焦点距離から計算するとどうなるか
 - ボケが正しいサイズよりも大きくなる
 - F値と絞り有効径のどちらを基準にするかで誤差も異なる
 - どちらも誤差があるがF値基準の方がさらに大きい
 - マクロ時は誤差が発散するので特に危険
 - 撮像倍率0.5倍でも2～3倍の誤差
 - 等倍マクロでは錯乱円が無限大になってしまう

エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

CEDEC

CESA Developers Conference

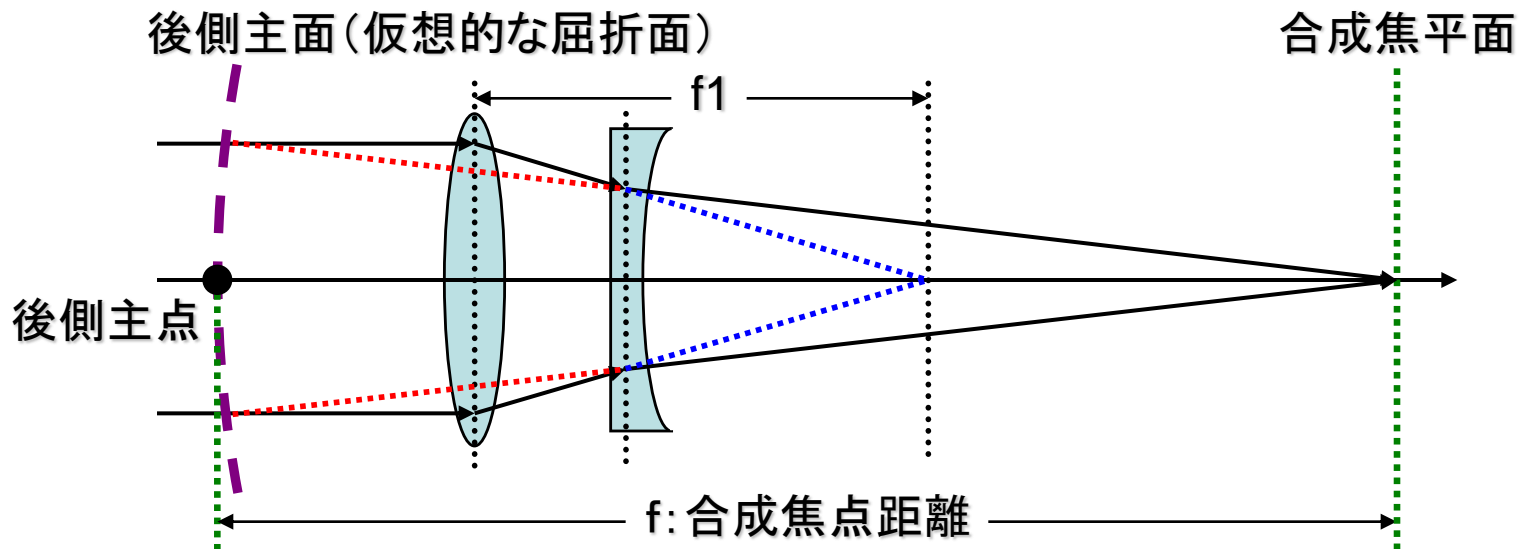
2010

現実のレンズ

- これまでの説明は薄肉単レンズ
 - レンズの厚みをほぼゼロとみなせる(仮想的な)レンズ
 - 屈折面も一面だけとみなす
 - 実際には1枚のレンズでも通常2箇所で屈折する
- 実際のレンズは複数のレンズの組み合わせ
 - 収差補正のため
 - ズーム機能などのため
 - レンズの組み合わせで一つのレンズ(光学系)を構成
 - さまざまな特性のレンズを組み合わせる
 - 複合レンズ

- 光学系も薄肉単レンズと同様の性質をもつ
 - 薄肉単レンズに置き換えて同じように考えることができる
- 合成パラメタの扱い
 - 薄肉単レンズとは異なる点がある
 - さまざまなパラメタが前側／後側に分かれる

- 主平面
 - 光路から薄肉単レンズとみなした際の主面を定義できる
 - 薄肉単レンズと異なり各主面の位置がずれる
 - 前側主面
 - 後側主面
 - 像距離(レンズ主面からの結像距離)に使う主面
 - 実用的なレンズでは主平面は焦点を中心とする球面となる
 - コマ収差補正のために必要な条件
 - 正弦条件



- 焦点距離

- 各レンズの焦点距離と間隔から全体の値が決まる

- 例えば2枚のレンズの組み合わせの場合

- $1 / f = 1 / f1 + 1 / f2 - d / (f1 * f2)$

- $f = f1 * f2 / (f1 + f2 - d)$

- f1 は第1レンズの焦点距離

- f2 は第2レンズの焦点距離

- d はレンズ間距離

- f は合成焦点距離

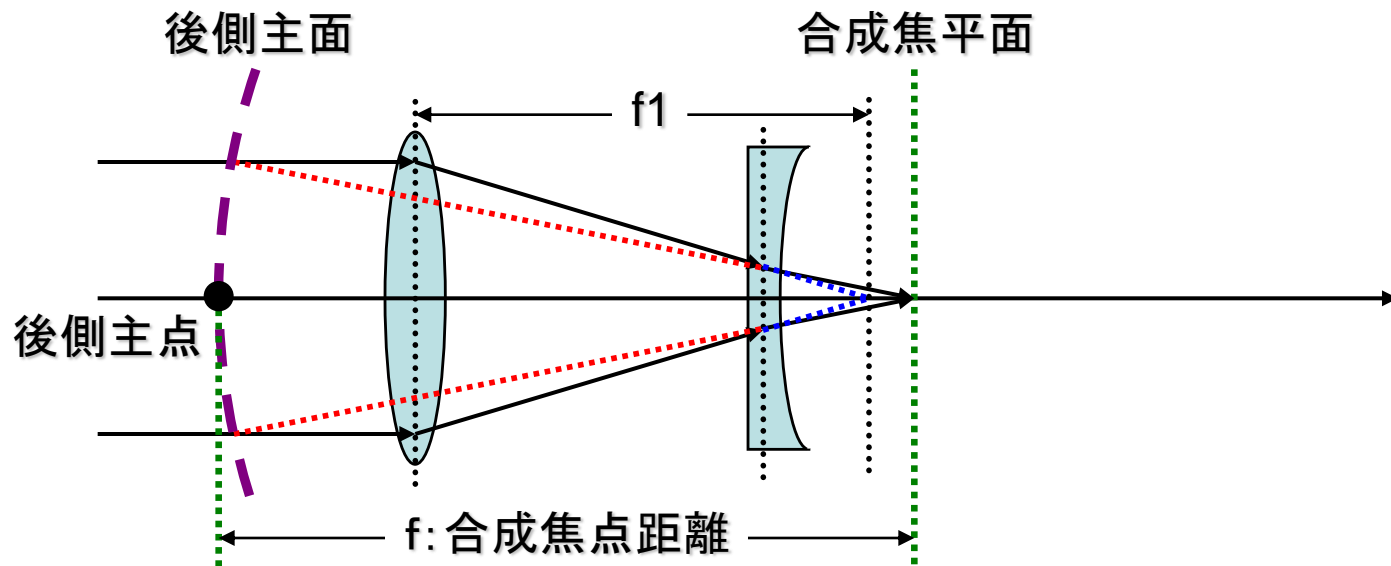
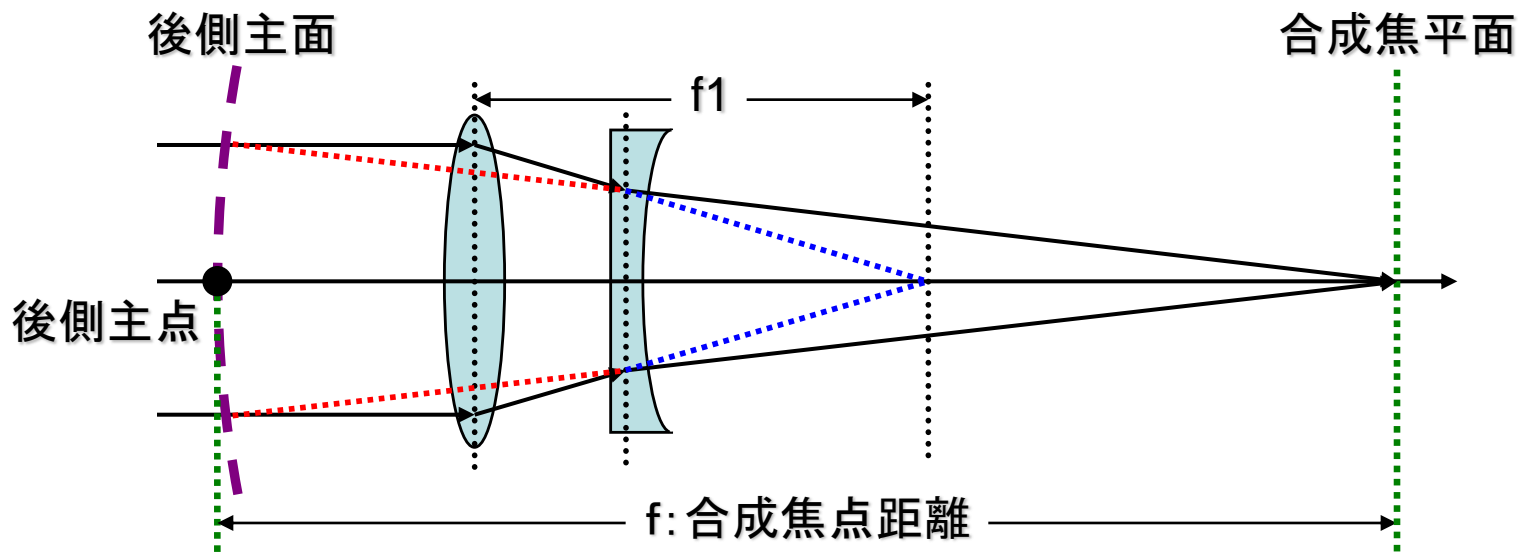
- (負の屈折力をもつ)凹レンズの場合は焦点距離は負の数で表す

- 凸⇒凹の組み合わせ光学系

- 間隔が長いほど合成焦点距離が短くなる

- » レンズの中央付近の方が屈折力が弱いため

光学系の合成パラメタ



- 入射瞳と開口絞りと有効径
 - レンズを前から覗いたときに見える絞りが入射瞳
 - 通常絞りの前部にあるレンズを通して見える虚像
 - この虚像が光学的な開口絞りとなる
 - 絞り有効径は入射瞳(虚像)の口径
 - 絞りの物理的な直径ではないことに注意
 - 絞りの前にあるレンズを通して見える大きさ



- 入射瞳と絞り有効径
 - 虚像なのでズームングなどでも絞り有効径は変化する
 - 通常望遠にすると絞り有効径が大きくなる
 - 明るさを保つためには望遠の方が大きな口径が必要
 - $F = f / D$



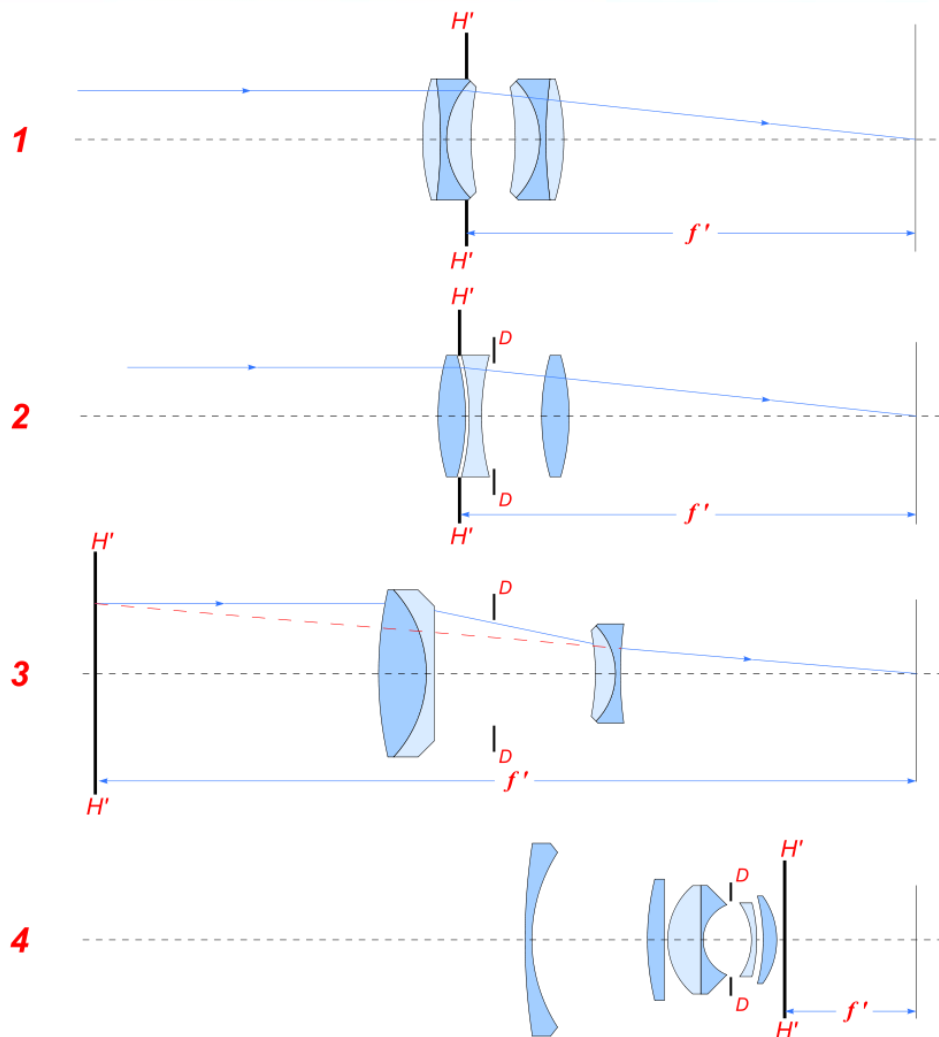
望遠



広角

さまざまなタイプの光学系

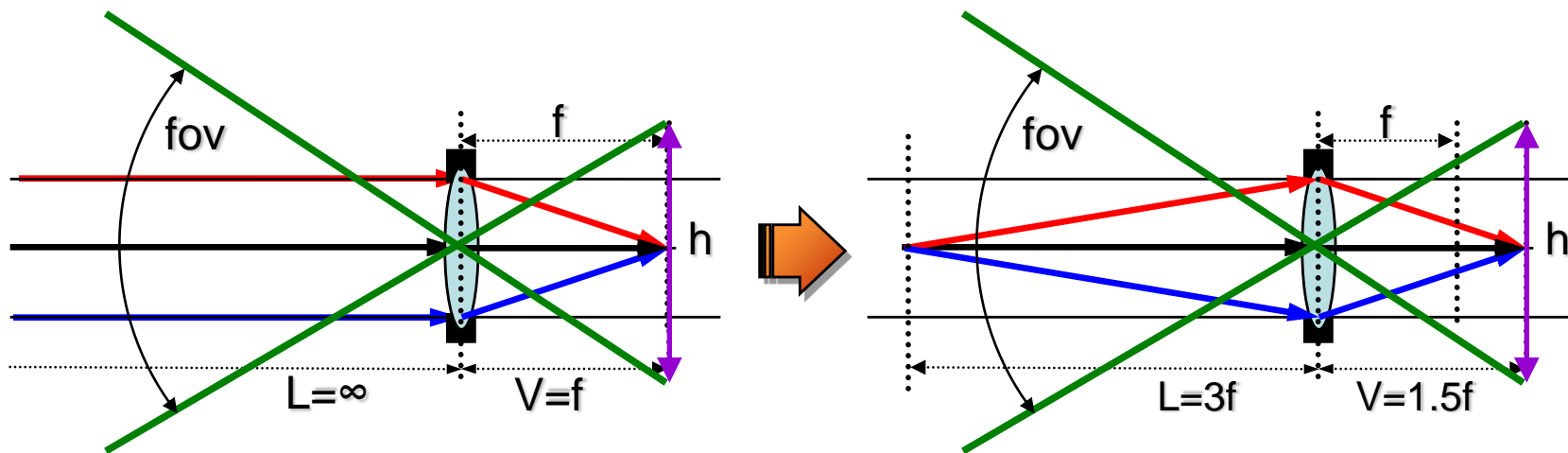
- f' は焦点距離
- $H'-H'$ は後側主面
 - 薄肉単レンズでの屈折面
- 薄肉単レンズと大きく異なる点
 - 仮想的な主面の位置
- 3 はテレフォト型
 - 主面がレンズの前方外側
 - 望遠レンズ
- 4 はレトロフォーカス型
 - 主面がレンズの後方外側
 - 広角レンズに多い



Русский: Главные плоскости объектива. [Panther](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lens_different_h.svg)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lens_different_h.svg

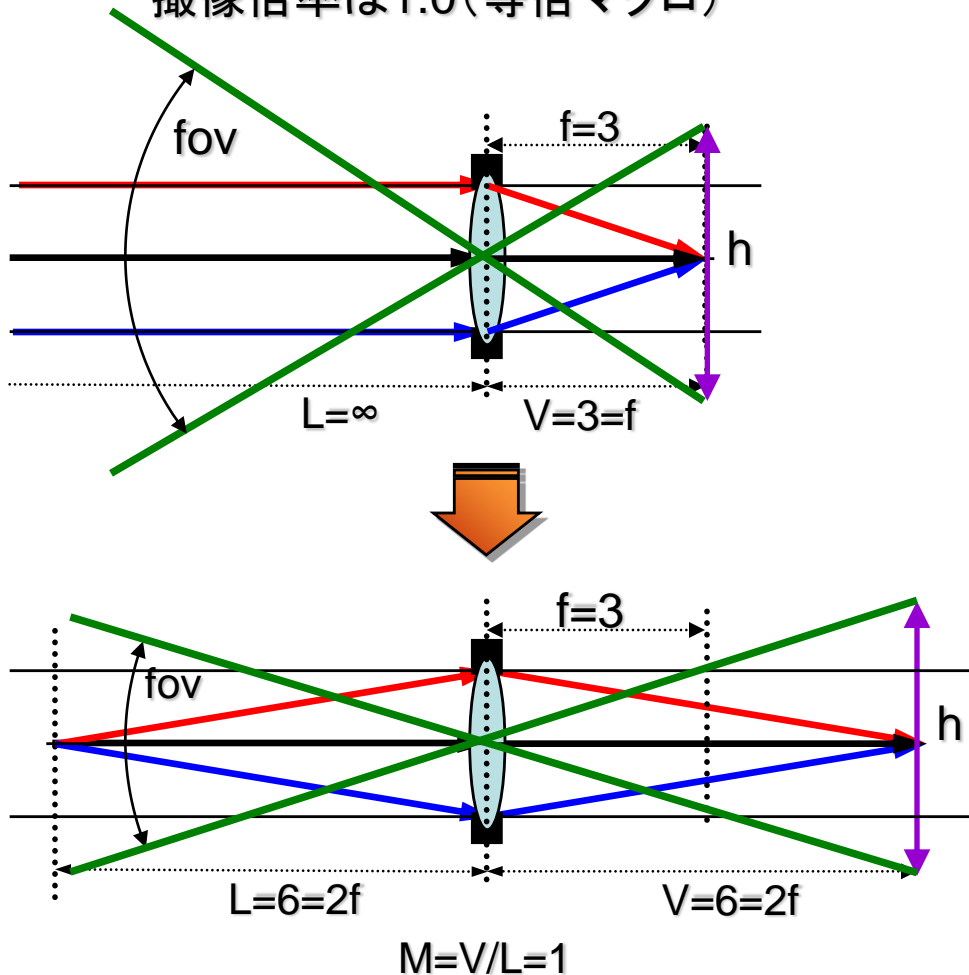
- 薄肉単レンズの理論で判っていること
 - 画角はイメージセンササイズと主面からの距離で決まる
 - 焦点距離が同じならフォーカスによって画角が変化する
 - 近くにフォーカスすると画角は狭く(望遠に)なる
- 現実のレンズではどうか？
 - 一部のレンズは近くにフォーカスすると望遠になる
 - 理論の通り
 - 一部のレンズは近くにフォーカスすると広角になる
 - 一部のレンズは近くにフォーカスしても画角が変わらない
- 実際にはレンズによって千差万別...

- 近くにフォーカスしても望遠にならないレンズがある
 - 代わりに焦点距離が短く変化していることを意味する
 - 焦点距離が変化しないなら必ずフォーカスで画角が変化する
 - 例えば近接撮影でも画角が変化しないレンズ
 - レンズとフィルムの距離を伸ばす代わりに焦点距離を縮めている
 - 画角や実効F値が変化せずにフォーカス距離だけが変わる
 - マクロ撮影でもレンズ主平面からの距離がまったく変化しない
 - 本来マクロはレンズ主平面からフィルムまでの距離が大きく伸びる

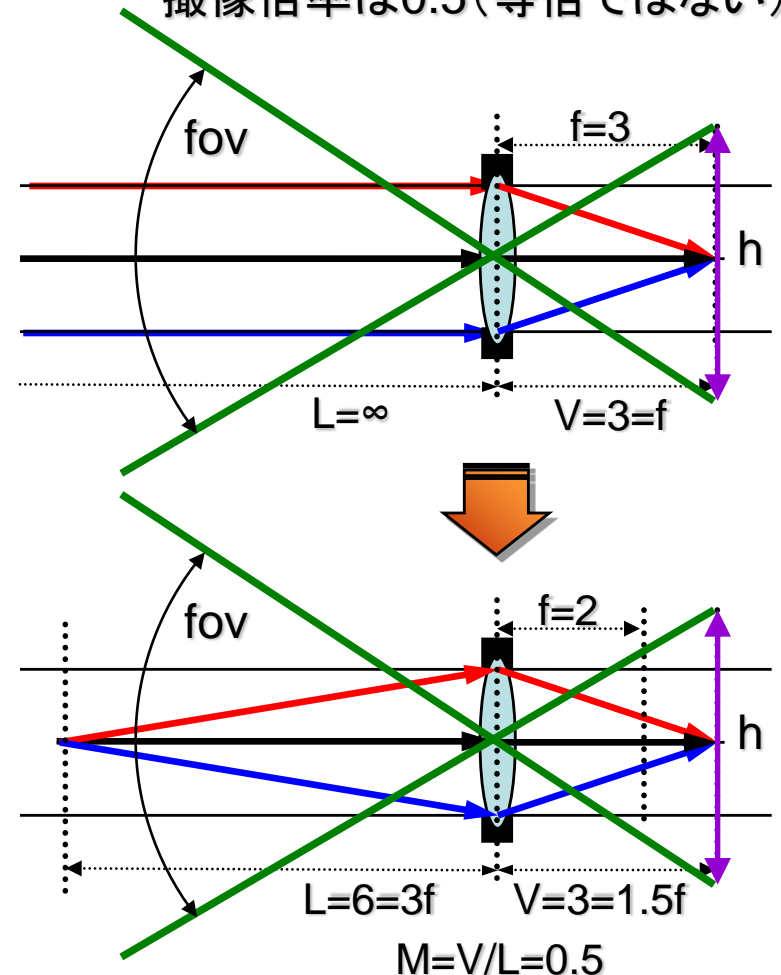


画角が変化しないフォーカシング

フィルムを後方 $2f$ に移動
焦点距離は変化しない
画角／実効F値が変化する
撮像倍率は1.0(等倍マクロ)



フィルムは動かない
代わりに焦点距離を $2/3$ に縮める
画角／実効F値は変化しない
撮像倍率は0.5(等倍ではない)



- レンズの仕様や表記上の「焦点距離」という言葉
 - 無限遠フォーカス時の焦点距離を表す
 - 無限遠時で最大5%以内の誤差
 - 近接撮影時の焦点距離の正しさはまったく規定されていない
 - レンズによってまったく異なる
- カメラマンの使う「焦点距離」という言葉
 - ほぼストレートに画角を意味していることが多い
 - マクロ時の光学的な望遠効果を理解している人もいる
 - しかし焦点距離が伸びていると考える人もいる
- いずれも光学的な意味での「焦点距離」とは異なる
- レンズを実装する際の「焦点距離」との違いに注意
 - 内部実装では光学的に厳密な「焦点距離」を使うべき
 - アーティスト向けツール/UIでは必ずしもそうではない
 - 後述

F値(Fナンバー)という言葉の扱われ方

- レンズの仕様や表記上の「Fナンバー」という言葉
 - 原則として無限遠フォーカス時のF値を表す
 - 無限遠フォーカス以外ではそもそも焦点距離が正確ではない
 - 一部のメーカーでは実効F値を表示している
 - マクロ時に画角が狭くなる場合に反映される
 - ただしそれでも完全に厳密ではない
 - F値は通常あまり細かい単位で評価されない
 - カメラのUIなどでは $2\frac{1}{2}$ や $2\frac{1}{4}$ 程度の単位
- 光学的な意味での厳密な「F値」とは異なる
 - カメラやレンズ／メーカーによっても異なる
- レンズを実装する際の「F値」との違いに注意
 - 内部実装では光学的に厳密な「F値」「有効F値」を使うべき
 - アーティスト向けツール／UIでは必ずしもそうではない
 - 後述

エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

CEDEC

CESA Developers Conference

2010

フォーカシング

- フォーカシングの仕組み
 - カメラ内のフィルム(イメージセンサ)は動かさない
 - 負荷が高くあまり現実的ではない
 - 代わりにレンズに何らかの変化を与えてフォーカスする
- レンズのフォーカシング機構
 - 全群繰り出し式
 - 前玉回転式
 - インナーフォーカス
 - リアフォーカス
- フォーカシングの機構によって画角の変化も異なる

- 全群繰り出し式
 - 比較的古いタイプのレンズや単焦点レンズ
 - レンズ全体が移動してフィルムから遠ざかる
 - もっとも単純な仕組み
 - フォーカシングによって画角／実効F値が変化する
 - 近距離にフォーカスすると画角が狭くなる
 - 近距離にフォーカスすると像が暗くなる
 - » 望遠になるため口径が同じなら実効F値は高くなる
 - » 焦点距離やF値は変化しない
 - 理論どおりの変化
 - 近接撮影時はレンズ全長が伸びる
 - マクロ時は特に大きく繰り出される
 - f 100mm の等倍マクロでは無限遠フォーカス時より 10cm 繰り出す
 - 前玉(先端のレンズ群)が回転する
 - クロスフィルタなどを付けると光芒も回転する
 - PL(偏光)フィルタなどが回転するので扱いにくい
 - フレア除けのレンズフードなどが回転するので扱いにくい

- 前玉回転式

- 比較的古いタイプのレンズや単焦点レンズ
- レンズの前玉(先端のレンズ群)だけが移動する
 - フォーカシングによって焦点距離が変化する
 - ただしレンズ構成によってまちまち
 - 画角／実効F値も変化したりしなかったり
- 近接撮影時はレンズ全長が伸びる
- 前玉(先端のレンズ群)が回転する
 - クロスフィルタなどを付けると光芒も回転する
 - PL(偏光)フィルタなどが回転するので扱いにくい
 - フレア除けのレンズフードなどが回転するので扱いにくい

- インナーフォーカス(インターナルフォーカス)
 - 近年の主流のレンズ
 - 特に望遠レンズに多い?
 - 光学系内部の一部のみが移動する
 - 一般的には絞りよりも前方の一部のみが移動
 - 前玉は移動しない
 - フォーカシングが速い
 - 近接撮影時に画角が広がるものが多い
 - 全群繰り出しなどとは逆の性質
 - 近距離にフォーカスすると像が明るくなる
 - 結像距離が短くなるため口径が同じなら実効F値が低くなる
 - F値はさらに低くなっている
 - 画角が変わらないものもある
 - 写真用の高級なレンズなど
 - 光学系の全長が変化しない
 - 前玉(先端のレンズ群)が回転しない
 - クロスフィルタなどを付けても光芒は回転しない
 - PL(偏光)フィルタなどが回転しないので扱いやすい
 - フレア除けのレンズフードなどが回転しないので扱いやすい

- リアフォーカス
 - 近年の主流のレンズ
 - 広角レンズの一部に多い？
 - 光学系内部の一部のみが移動する
 - 一般的には絞りよりも後方部分が移動
 - 前玉は移動しない
 - フォーカシングが速い
 - 近接撮影時に画角の変化
 - 広角になる
 - 変わらないものもある
 - 光学系の全長が変化しない
 - 前玉(先端のレンズ群)が回転しない
 - クロスフィルタなどを付けても光芒は回転しない
 - PL(偏光)フィルタなどが回転しないので扱いやすい
 - フレア除けのレンズフードなどが回転しないので扱いやすい

- 近接撮影時の画角
 - 比較的古いレンズや単焦点レンズでは望遠になりやすい
 - 理論どおり
 - 近年の特に望遠レンズでは広角になりやすい
 - 近接撮影時には焦点距離が1/3程度にまで縮むレンズもある
 - 撮像倍率が 0.2~0.5 程度でも
 - 一部のレンズでは画角が変化しない
 - 高級な写真用レンズに多い？
- 多くのレンズでは画角が変化する
 - 画角が変化する方が自然に感じやすい

- 画角変化の計算

- $f = h / (\tan(\text{fov} / 2) * 2)$

- $V = Lf / (L - f)$

- $\text{fov}' = \text{atan}(h / (V * 2)) * 2$

- fov は無限遠フォーカス時の画角

- fov' は変化された結果の画角

- h はイメージセンサの物理サイズ

- L はフォーカス距離

- V は後側主面からイメージセンサまでの垂直距離

- fov, h, L から計算できる

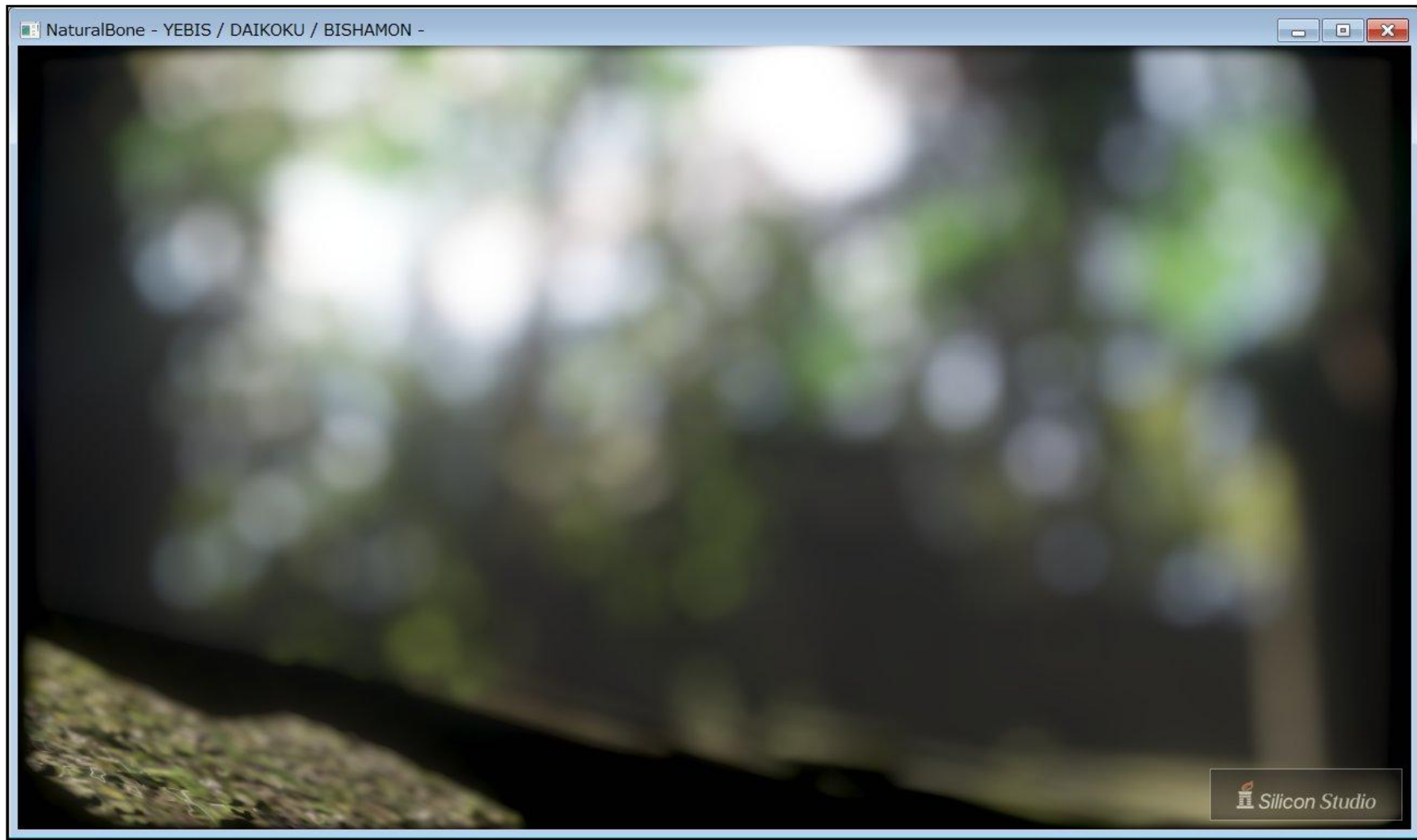
- 光学理論どおり

- 焦点距離は変化しない

- フォーカシング機構の違いなどを反映
 - $f = h / (\tan(\text{fov} / 2) * 2)$
 - $s = L / (L - f)$
 - $sr = \text{pow}(s, r)$
 - $V = f * sr$
 - $f' = V / s = f * sr / s$
 - $\text{fov}' = \text{atan}(h / (V * 2)) * 2$
- f' は変化後の画角から逆算できる光学的に厳密な焦点距離
 - フォーカス距離などによって変化する
- r は画角変化の調整ファクタ
 - 正確なシミュレーションではなくそれらしく調整するためのパラメタ
 - おおよそ -1.0~1.0 程度の範囲で効果を調整
 - 1.0 で光学理論どおりに画角が変化
 - » 全群繰り出し(典型的な単焦点レンズなど)
 - » 焦点距離が変化しない
 - 0.0 では画角が変化しない
 - » 代わりに逆数の割合で焦点距離が縮む
 - » 一部の高級レンズなど
 - -1.0 では逆の方向に逆の割合で画角が変化
 - » 焦点距離は大きく縮む(-1.0 の場合は逆数の2乗)
 - » 典型的なインナーフォーカスレンズ
 - » レンズによっては $r = -2.0$ 程度を指定した状態まで焦点距離が縮むこともある



近距離フォーカス (全群繰り出し: $r = 1$)

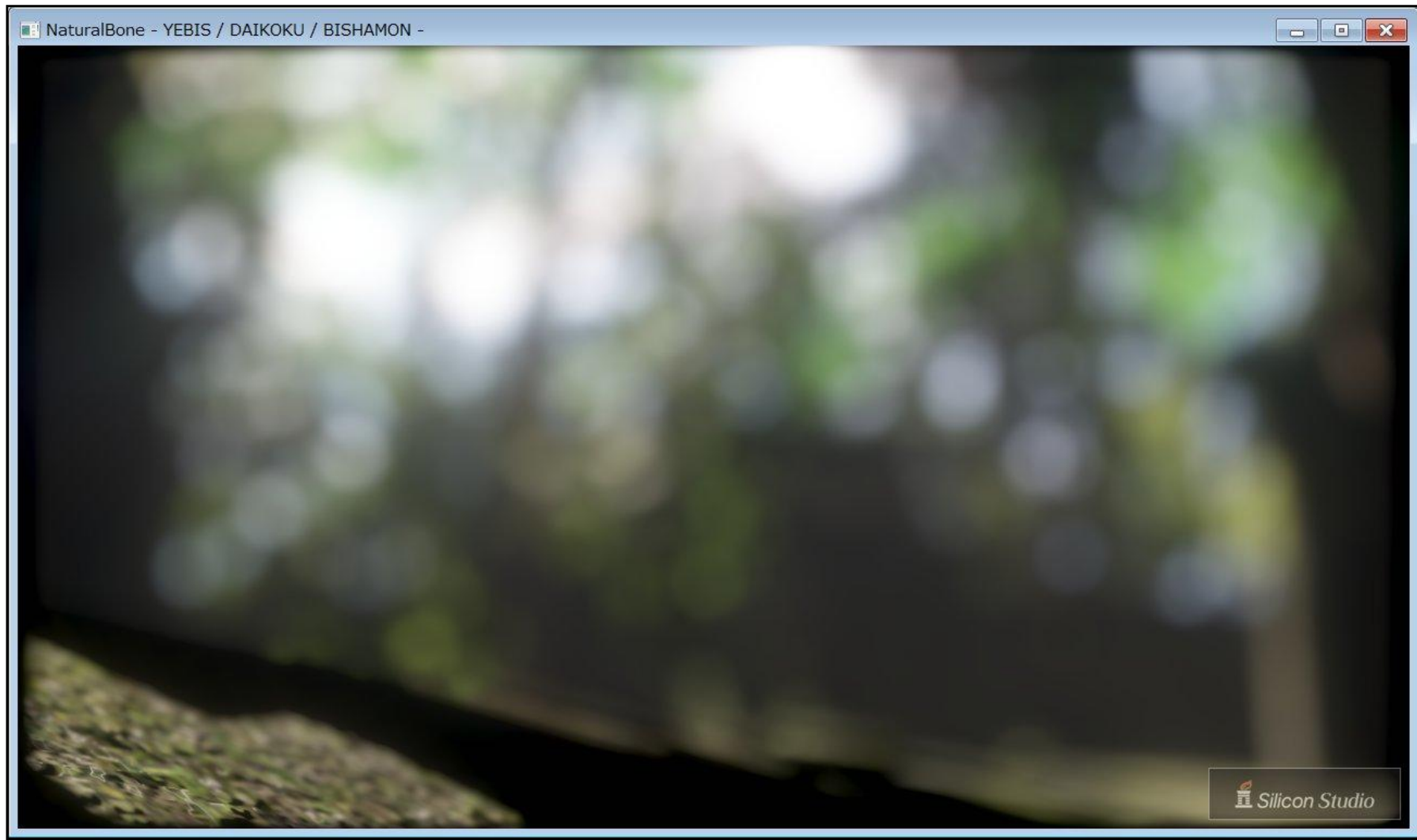




近距離フォーカス (インナーフォーカス: $r = -1$)



近距離フォーカス (全群繰り出し: $r = 1$)



- フォーカシング時のフォーカス距離の変化率
 - フォーカス距離は像距離の逆数に比例
 - 基本は像距離(主面/フィルム距離)を動かすことでフォーカス
 - 結像公式によりフォーカス距離は像距離に反比例する
 - 全群繰り出し式
 - 理論どおり
 - フォーカス距離は繰り出し量の逆数に比例
 - 他のタイプではフォーカスはもっと複雑
 - しかし大雑把には操作量の逆数に比例
 - フォーカスリング
 - » リングの刻み幅を見ると判りやすい
 - 操作パネル
 - オートフォーカス等
 - ほとんどのレンズでほぼフォーカスの逆数が線形に移動

- 自然なフォーカシングアニメーション
 - フォーカス距離は逆数空間で線形に移動させると自然
 - ボケの大きさは結果として線形にアニメーション
 - フォーカス距離を線形に移動させないように注意
 - 非常に不自然な動きになる
 - ボケの大きさが反比例の形で変化する
- マクロ撮影時のフォーカシングに注意
 - 逆数だとマクロ時のフォーカス移動に時間がかかる
 - 撮像倍率があまりに高いと永久にフォーカスできない
 - マクロにし過ぎないように制限をかける方がよい
 - 等倍マクロ程度までにしておく
 - 焦点距離の2倍より近くにはフォーカスさせない

エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

CEXEC

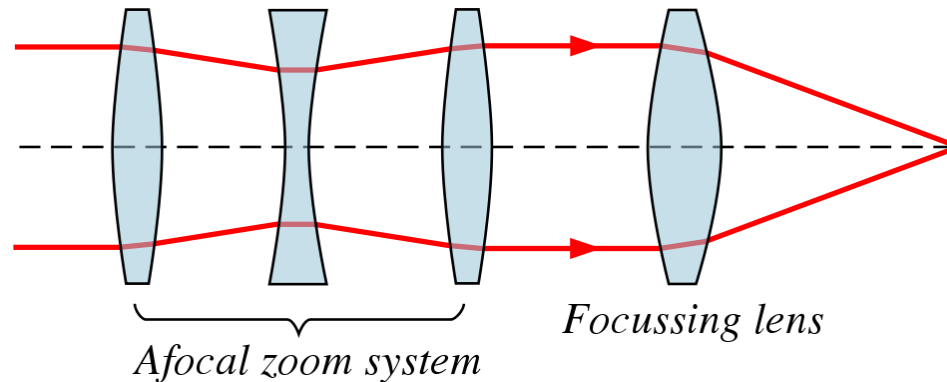
CESA Developers Conference

2010

ズーミング

- ズームレンズとは
 - 焦点距離を変化させることができる光学系
 - 一般にはバリフォーカルレンズ
 - 本来は変倍時にフォーカスが変化しないもの
 - 厳密ではなく実質的に変化しないとみなせるレベル
 - 近年はオートフォーカスで誤差を修正することも多い
- 光学系を構成するレンズ群の間隔などで制御

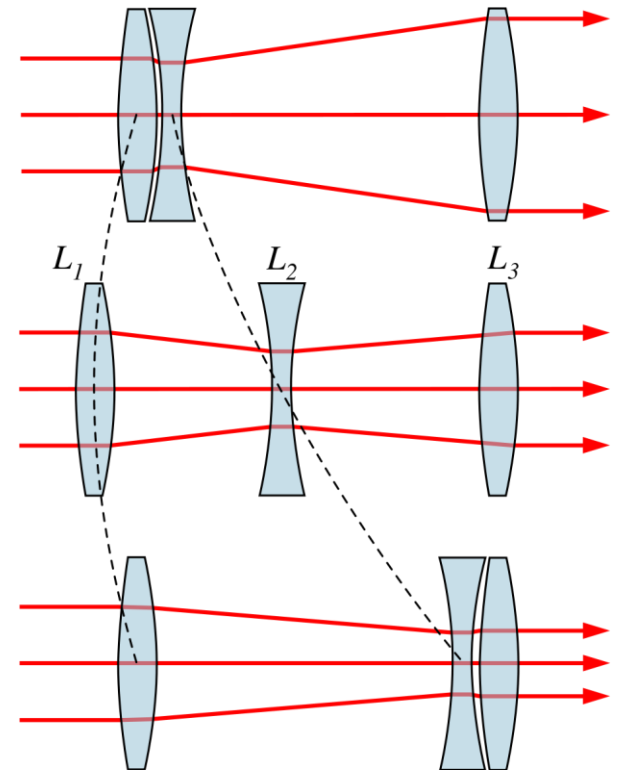
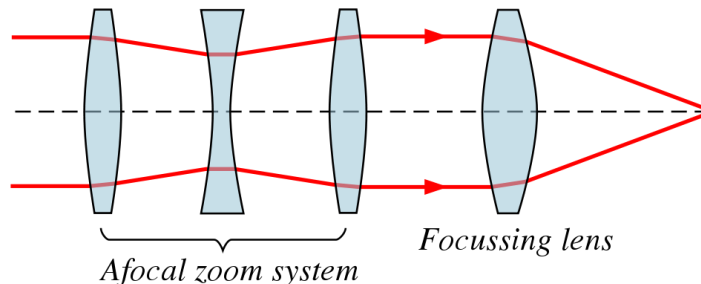
- 比較的簡単なズームレンズの原理
 - 左のレンズ群(3枚)が変倍系(ヴァリエータ)
 - この例では無焦点系(アフォーカル系)
 - 焦点距離が無限大
 - 平行光束が入射すると平行光束を射出する光学系
 - 望遠鏡など
 - 右の凸レンズはフォーカス系
 - この凸レンズの移動でフォーカシングを行う
 - この例では平行光束が入射するため焦点距離は変化しない



A simple zoom lens system. [DrBob](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Zoomlens1.svg), SVG by [User:Jxjl](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Zoomlens1.svg)
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Zoomlens1.svg>

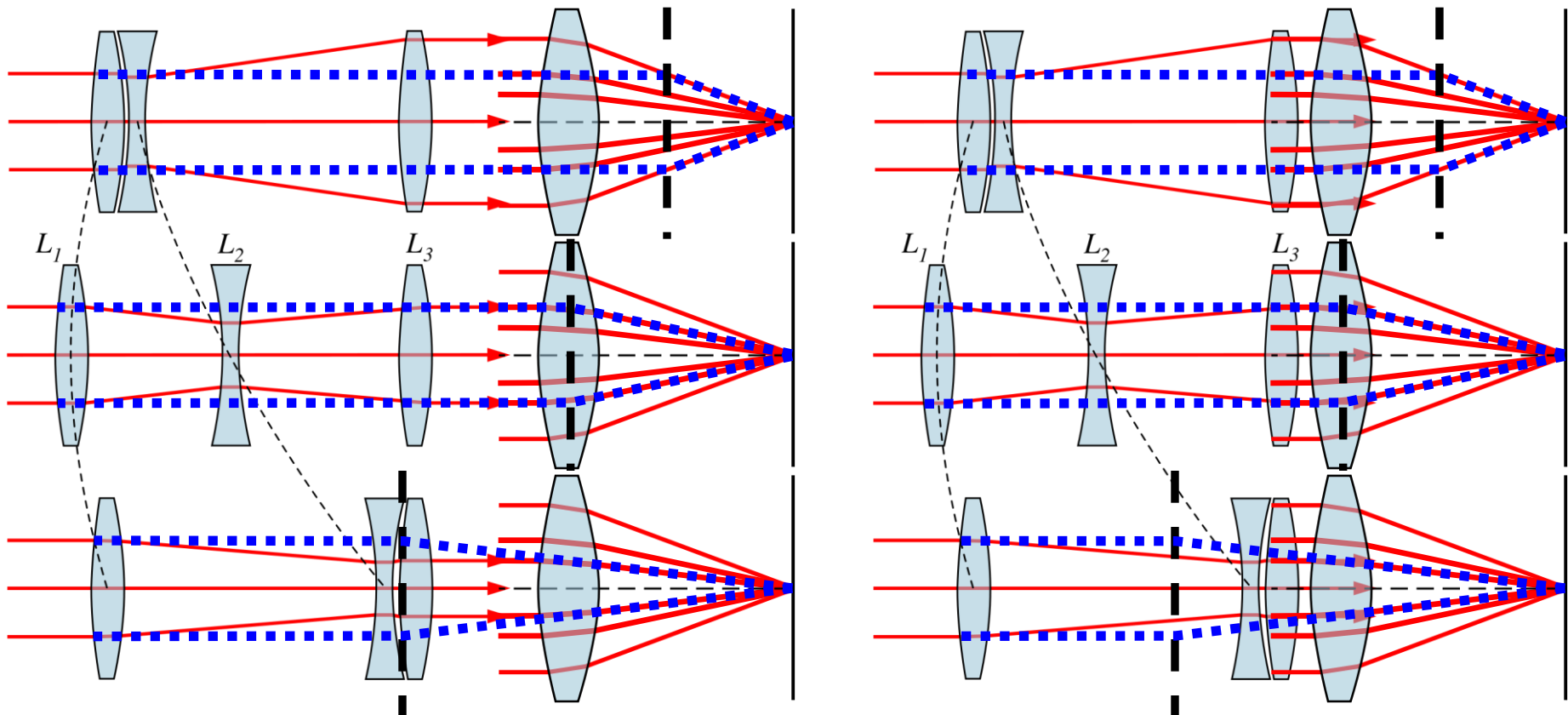
- 変倍系の役目

- 平行光束の幅を変化させる
- 幅が狭くなると
 - 最後のレンズの中央部のみを通る
 - 凸レンズとしての屈折力が弱い
 - 光学系全体の焦点距離が伸びる
- 平行光束なのでフォーカスは一定
 - ズーミングでフォーカスが変化しない



Movement of lenses in a zoom lens. [DrBob](#), SVG by [User:Jxjl](#)
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Zoomlens2.svg>

変倍系の働きによる焦点距離の変化



Movement of lenses in a zoom lens. [DrBob](#), SVG by [User:Jxjl](#)
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Zoomlens1.svg>
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Zoomlens2.svg>

ズーミングによる焦点距離の変化率

- 焦点距離の変化
 - ズーミングの仕組みによって異なる
 - 複数のレンズの動きの組み合わせとなるため複雑
 - 単純な関数ではなく複雑なカーブを描く
 - 特にズーム比の大きなレンズは動作が段階的に分かれることがある
 - 短焦点用／長焦点用の機構が異なる
 - 途中でカーブが変化したりする
 - おおよそ2種類の傾向
 - 望遠側の方が変化の度合いが高い傾向
 - 焦点距離が逆数空間で線形に移動
 - 焦点距離が対数空間で線形に移動
 - 広角側の方が変化の度合いが高い傾向
 - 実際には複数の関数の組み合わせになっている
 - 自然なズーミングアニメーション
 - 方式とレンズによって大きく異なるためあまり正解がない
 - 実装上は指数関数的に(対数空間で線形に)変化させる方法が無難
 - ゲームなどではズーム比が非常に大きくなることが多いため

- ズームレンズはフォーカスが移動しない
 - 本来フォーカス状態からズームしてもフォーカスしたまま
- 実際にはフォーカスがずれることがある
 - オートフォーカスで補正する最近のレンズ
 - オートフォーカスが遅いとズームでフォーカスがずれる
- オートフォーカスの方式による違い
 - アクティブ方式
 - パッシブ方式
 - 位相差検出方式
 - コントラスト検出方式

- アクティブ方式
 - 赤外線などの反射で直接距離を測定する
 - 遠い景色やガラスなどではフォーカスを誤ることがある
- パッシブ方式
 - 画像処理による方式
 - 暗い場所やコントラストの無い画像ではフォーカスできないことがある
 - 主に2種類の方式がある
 - コントラスト検出方式
 - 画像のコントラストによってフォーカスをチェック
 - 試行錯誤的にフォーカスを合わせる
 - 反対方向に動いたり迷ったりしやすい
 - 全般的にオートフォーカスが遅い
 - » ズーミングに追いつけないことが多い
 - コンパクトデジカメの主流
 - 位相差検出方式
 - 視差画像から距離を計算する
 - 距離が直接判るため迷いにくい
 - フォーカシング機構にもよるが全般的にオートフォーカスが速い
 - デジタル一眼レフの主流

エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

CEDEC

CESA Developers Conference

2010

カメラ座標系

- CGにおけるカメラ座標系の原点はどこか？
- 薄肉単レンズではレンズの中心
 - 主平面／絞りなどの中心と一致
 - ピンホールカメラでは穴（絞り）の中心
- 光学系（複合レンズ）の場合
 - カメラの向きを変えても視差の生じない位置
 - NPP (non parallax point)
 - パノラマやライトプローブ撮影で重要
 - 入射瞳（絞りの虚像）の中心
 - レンズを前方から覗いたときに見える絞りの中心部分
 - ノーダルポイント（前側主点）と混同されることもあるが異なる

- NPPは鏡筒の前方よりにあるレンズが多い
 - カメラ全体から見るとかなり前方より
- レンズのタイプによる特徴
 - 望遠レンズ
 - レンズの後方側によりやすい
 - 広角
 - レンズの前方側によりやすい
- ズーミングやフォーカシングによっても変化
 - レンズ依存
 - ほとんど変化しないレンズもある



- ズーミング時の移動の特徴
 - ズーム比の小さいレンズ(おおよそ2以下の場合)
 - 望遠時に後方に移動するものが多い
 - ズーム比の大きいレンズ
 - 広角時と望遠時に前方に移動するものが多い
 - その中間では後方に移動
 - 図のレンズは望遠時に前方に移動
 - どちらかといえば少数派



- 人がカメラを扱った場合や三脚に固定した場合
 - NPPは回転軸より前側になることが多い
 - カメラ操作の中心よりも前方にNPPがあるため
 - 手持ちのカメラの場合特に大きく前方にある
 - 回転軸(体の軸)はカメラから遠い
- レンダリング時のカメラ座標系
 - 操作時よりも前方に移動させる方が自然
 - おおよそ数センチ～数十センチ程度
 - 広角時の方がより大きく前方にする
 - ズーミング時にさらに移動させる場合
 - ズーム比が大きい場合は広角と望遠でもっとも前方に
 - ズーム比が小さい場合は広角でもっとも前方に

エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

CEDEC

CESA Developers Conference

2010

用途別のカメラとレンズ

- 写真用カメラとレンズ

- 大きく2つの傾向
 - 主に一眼レフに代表される高画質用途
 - 目的にもよるがもっとも画質が優先される
 - 大きな撮像フォーマット
 - 現在の主流は APS-C 相当サイズ
 - » $\sim 23.6 \times 15.7\text{mm}$
 - よく収差の補正された高性能なレンズ
 - コンパクトデジカメに代表される大衆向け
 - 主に扱いやすさ／コストパフォーマンスに重点がおかれる
 - その上での画質が重要
 - 非常に小さな撮像フォーマット
 - 現在の主流は 1/2.3"型
 - » $6.16 \times 4.62\text{mm}$
 - イメージセンササイズと比較すると非常に多い画素数
 - 特にズーム比に比重がおかれたレンズ設計
 - レンズ性能はあまり高くないがサイズが小さいため収差が目立ちにくい
 - コストパフォーマンスが高い

- 撮像フォーマット
 - 大判(シート・フィルム)の代表的なフォーマット
 - 8×10 " : 200×250 mm
 - 4×5 " : 100×125 mm
 - 中判(ブローニー)の代表的なフォーマット
 - 6×9 cm : 56.0×82.6 mm
 - 6×4.5 cm : 56.0×41.5 mm
 - 主に一眼レフ向けのフォーマット
 - 35mm : 36.0×24.0 mm (対角42.27mm)
 - APS-C : $\sim 23.6 \times 15.7$ mm (対角 ~ 28.3 mm)
 - $4/3$ "型(フォーサーズ) : 17.3×13.0 mm (対角21.13mm)
 - 主にコンパクトデジカメ向けの小さなフォーマット
 - $2/3$ "型 : 8.8×6.6 mm (対角11.07mm)
 - $1/1.8$ "型 : 7.18×5.32 mm (対角8.93mm)
 - $1/2.5$ "型 : 5.76×4.29 mm (対角7.18mm)
 - $1/3$ "型 : 4.8×3.6 mm (対角6.0mm)

- 画像としての特徴
 - 一眼レフに代表される高画質向け
 - 画質が高い
 - ボケのクオリティが高い
 - » 絞り羽根の枚数が多い
 - 目に見える収差が少ない
 - 小絞りボケなどで全体がボケることが少ない
 - ディフラクションリングなどがほとんど見えない
 - 高感度時のノイズが比較的少ない
 - 被写界深度が浅い
 - ボケが大きい
 - 特に単焦点レンズはF値が低い(絞りが大きい)
 - » 開放で $f/1.4 \sim f/2.8$
 - » ズームレンズでは開放で $f/2.8 \sim f/5.6$ 程度
 - オートフォーカスが速い
 - 迷わない

- 画像としての特徴

- コンパクトデジカメなど

- 画質はピンキリ

- ボケのクオリティは全体的にあまり高くない

- » 絞り形状が四角形などもある

- 小絞りボケが起きやすい

- 高感度時のノイズが多い

- 被写界深度が非常に深い

- ボケがかなり小さい

- f/3~f/5 以上

- オートフォーカスが遅い

- 反対方向に動いたり迷ったりしやすい

- ズーミングの際にフォーカスが大きくずれたりする

- » ズーム中は至近距離にフォーカスが移動した状態になるものも

- 放送用カメラとレンズ

- クォリティとともにリアルタイム性を重視
- **イメージセンサは小さめ**
 - 2/3"型(対角11.07mm)などが主流
 - コンパクトデジカメの最大サイズ相当
 - ボケが写真(スチルカメラ)用 35mm フィルムの 1/4 程度となる
 - 映画用 35mm フィルムと比較すると 2/5 程度(後述)
- 非常に高速なズーミングやフォーカシング
- **超望遠／超高倍率ズーム**
 - ズーム比が100倍を超えるようなレンズも
 - 焦点距離が約10mm～1000mmなど
 - 35mm フィルム換算では40mm～4000mm程度に相当
 - 画角では約40度から約0.4度(月や太陽の視直径よりも狭い)
 - 全域にわたって収差が非常に高度に補正されている

- 焦点距離の長さから考えると非常に明るい
 - 望遠側でも開放F値が $f/4 \sim f/5$ 前後など
 - 絞り有効径が20cmほどになるようなレンズもあるということ
 - HD解像度ではこのくらいでないと回折限界に達する
- 映像としての特徴
 - イメージセンサが小さいため被写界深度が深い
 - 原則としてボケは小さい
 - ただし超望遠時は焦点距離が長いためボケもよく発生する
 - 高倍率な超望遠のズームが多用される
 - その割には高速なズーミングとフォーカシング
 - オートフォーカスも速い
 - 高感度時のノイズが比較的多い
 - 一眼レフなどと比較すると多め
 - コンパクトデジカメよりは少なめ

- 映画用カメラとレンズ

- クォリティを重視
 - 一眼レフと似た傾向
 - ズーム性能も重要視される
- 35mm フィルムが主流
 - 写真(スチルカメラ)用と異なり縦送りのため撮像サイズは約半分
 - 22×16mm
 - APS-C サイズ相当
 - 映画撮影用フィルムのフォーマット
 - 70mm:52.50×23.00mm(対角57.32mm)
 - 35mm:22.00×16.00mm(対角27.20mm)
 - 16mm:10.26×7.49mm(対角12.70mm)
 - 8mm:4.50×3.30mm(対角5.58mm)
 - デジタルでは 2/3"型～16mm 程度のものが主流
 - ボケが 35mmフィルムと比較して 1/3～3/4程度
 - 35mmフィルムと同等サイズの製品もある

- 映像としての特徴
 - 放送用カメラと高画質写真用カメラの中間程度
 - 画質は全体的に高い
 - 収差が少ない
 - ボケが大きく綺麗
 - 一眼レフなどの写真よりは小さめ
 - コンパクトデジカメや放送用カメラよりは大きい
 - 比較的中望遠～望遠気味のレンズが多用される
 - 広角レンズはあまり使用されない傾向がある
 - 魚眼レンズなどがデフォルメ表現として利用されることもある
 - ボケの大きさにも寄与

エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

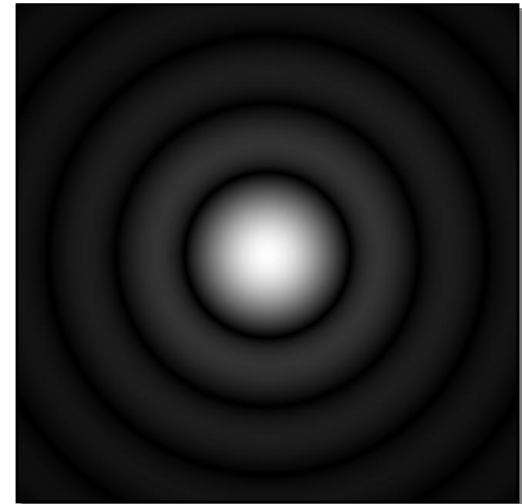
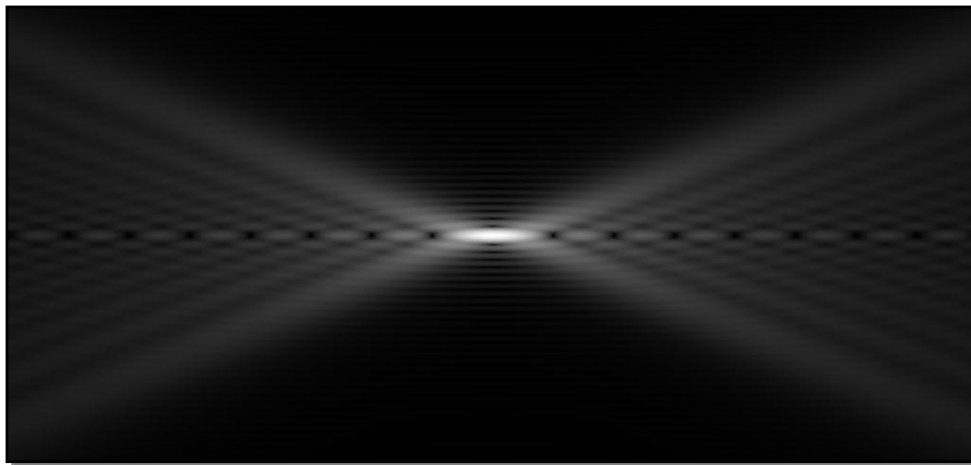
CEDEC

CESA Developers Conference

2010

撮像フォーマットと回折限界

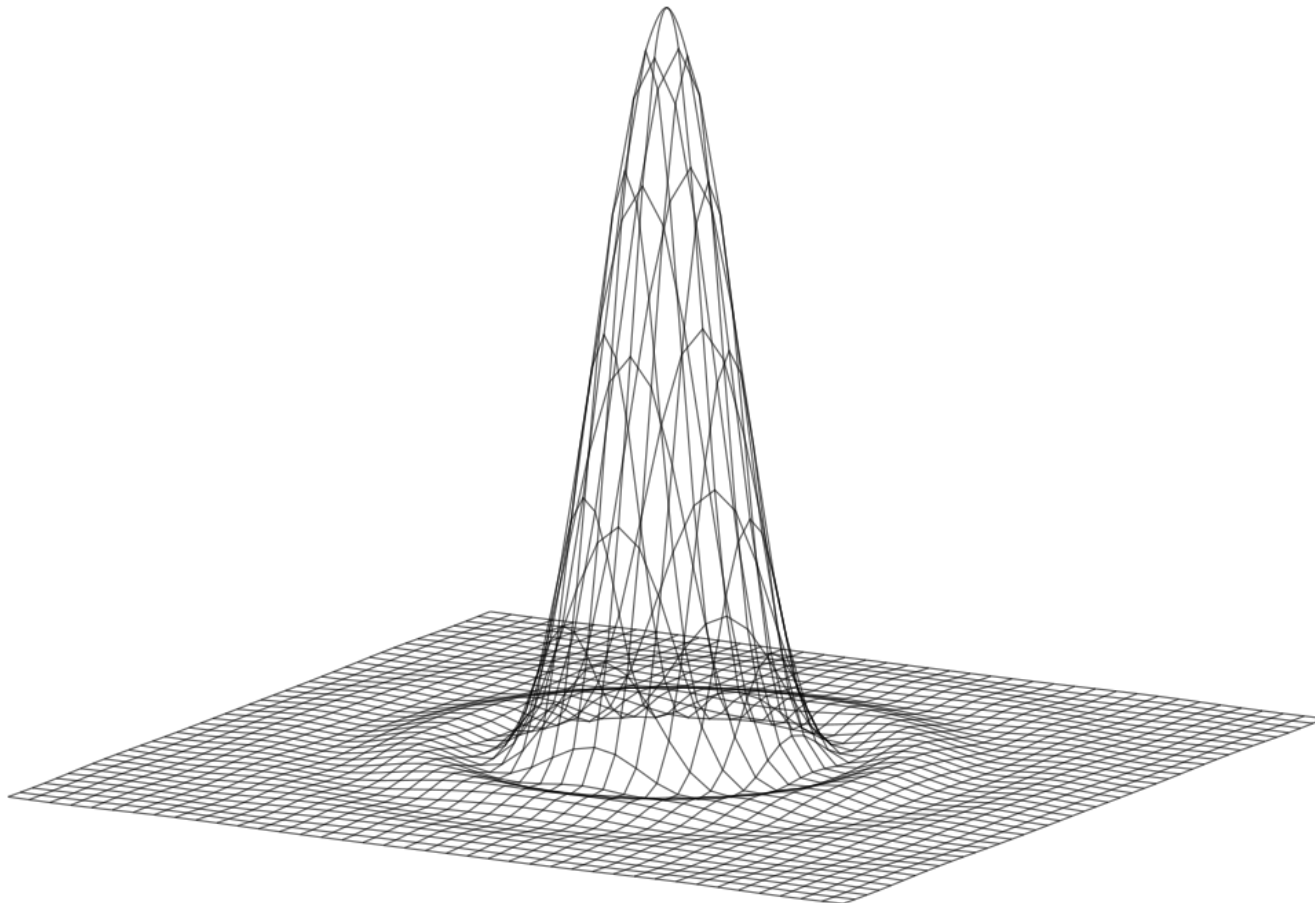
- 光(電磁波)の波としての性質
 - 開口絞りを通った光束は回折により一点に集光できない
 - 波動光学的な限界により解像力が制限される
 - 回折による干渉リング(エアリーパターン)を生じる
 - 中央部の明るい円をエアリーディスクとよぶ



<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Spherical-aberration-slice.jpg>

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Airy-pattern.svg>

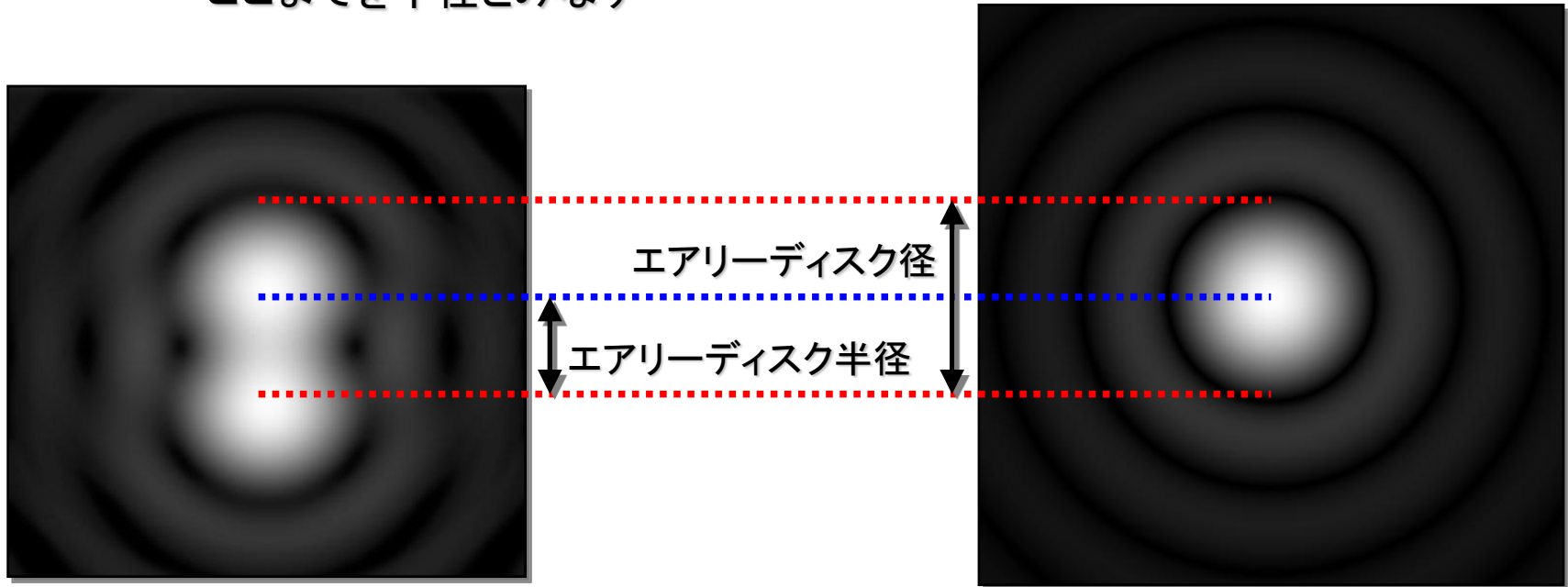
From Wikipedia, the free encyclopedia



<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Airy-3d.svg>

From Wikipedia, the free encyclopedia

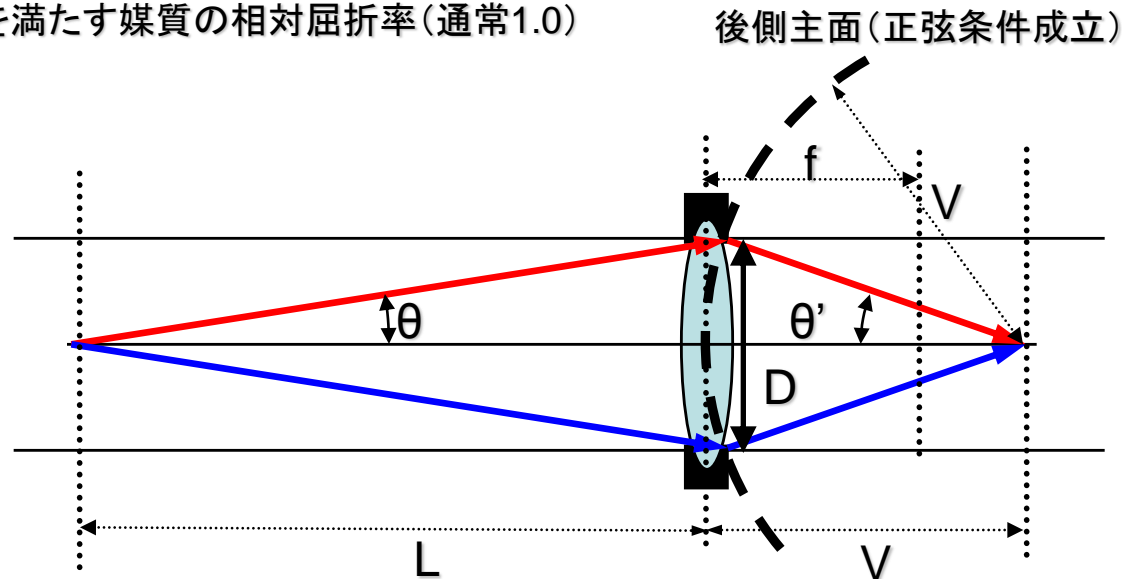
- レイリー限界に基づく距離
 - これより離れた点像は2点に分離していると判断できる距離
 - 経験則的な値
 - 天体観測などでは星が点像である前提から少し違った基準が使われている
 - エアリーディスク周辺部の最も暗い部分までの距離
 - ここまでを半径とみなす



<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Airy-pattern.svg>

From Wikipedia, the free encyclopedia

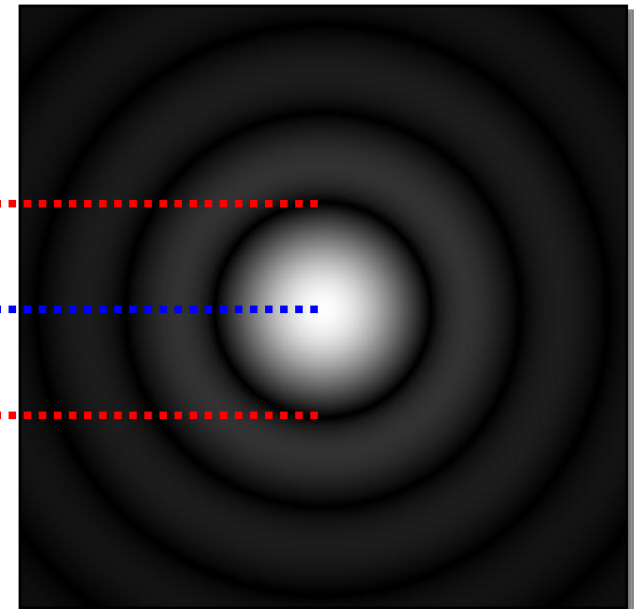
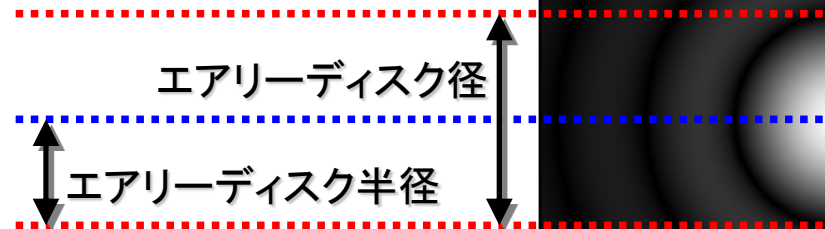
- 開口数 (NA: Numerical Aperture)
 - 集光の限界を表す指標
 - 大きいほどシャープに集光できる
- 物体側NA
 - $NA = n \times \sin(\theta)$
 - θ は物体側集光角の半角
 - n は物体側を満たす媒質の相対屈折率(通常1.0)
- 像側NA
 - $NA = n \times \sin(\theta')$
 - $NA = n / 2Fe = nD / 2V$... 正確には正弦条件が成立しているときのみ
 - θ' は像側集光角の半角
 - n は像側を満たす媒質の相対屈折率(通常1.0)
 - $Fe = f / V$



- エアリーディスクの大きさ

- $d = 2 \times 1.2196\lambda Fe / n$

- d はエアリーディスクの直径
 - λ は光(電磁波)の波長
 - n は像側を満たす媒質の相対屈折率(通常1.0)
 - ただし正弦条件成立時



<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Airy-pattern.svg>

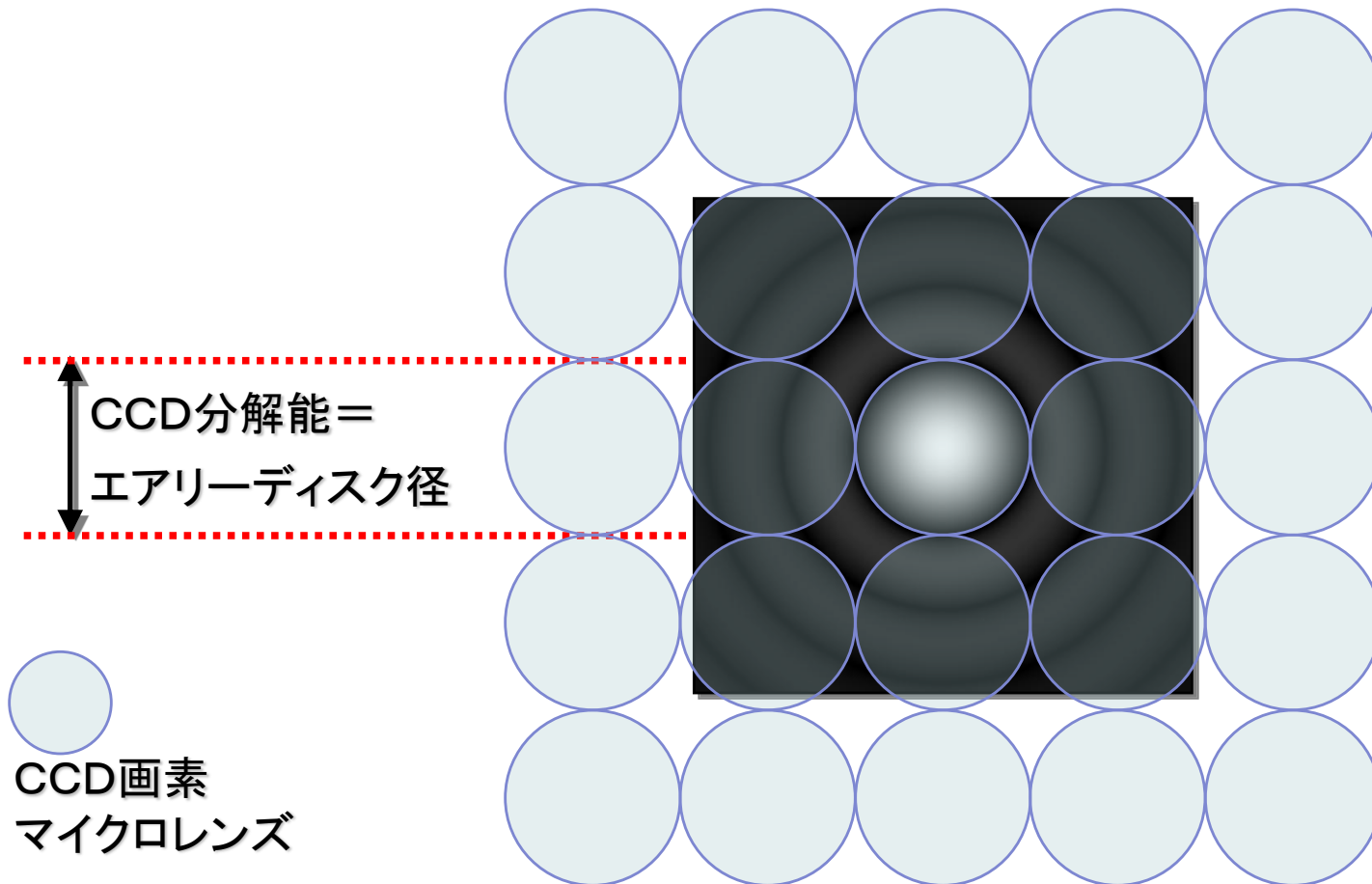
From Wikipedia, the free encyclopedia

- 以上から判ること
 - 通常光の波長と屈折率は固定パラメタとなるため
 - エアリーディスク径は集光角のみで確定する
 - エアリーディスク径は実効F値のみでも確定する
 - 正弦条件の成り立つ理想的なレンズの場合
 - 実効F値が低い(絞りが大きい)ほど鋭く結像できる
 - エアリーディスク径が小さくなる
 - ただしレンズの収差を考慮しない場合
 - 収差は逆に絞りが大きいほど極端に大きくなるので注意
 - 絞り込むほどエアリーディスク径は大きくなる
 - シャープに結像できなくなる

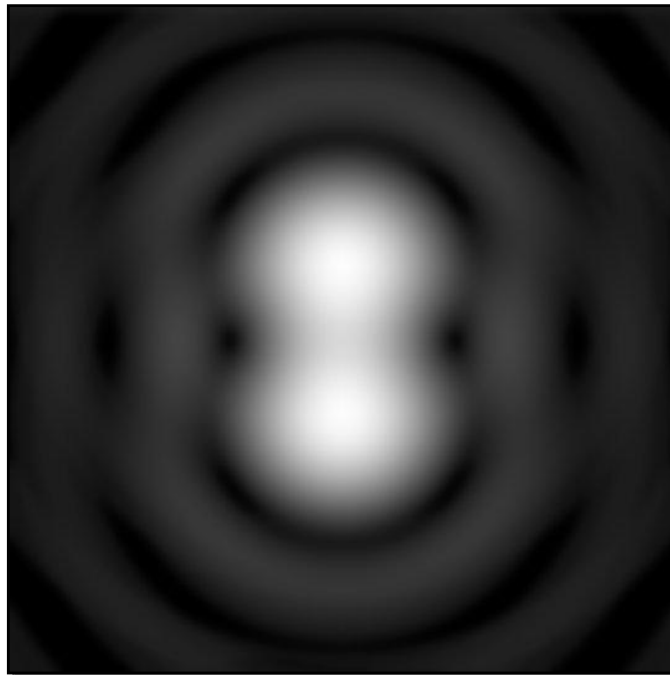
- エアリーディスク径が画素と比較して大きいと全体がボケる
 - 小絞りボケ
 - 画素の細かさが集光の限界を超えている状態
 - エアリーディスク径が画素と比較して小さいことが重要！
 - 画素のサイズ = $\text{イメージセンササイズ} / \text{画素解像度}$
- 実際にはレンズの解像力等も考慮する必要がある
 - レンズの収差は回折とは逆の性質
 - 絞りが大きいほど収差は極端に大きくなる
 - 解像力が低下する
 - つまり実効F値が大き過ぎても小さ過ぎても解像力が落ちる
 - 両方のバランス点がもっとも解像力が高い
 - ここでは収差は考慮しない

エアリーディスク径とセンサの分解能

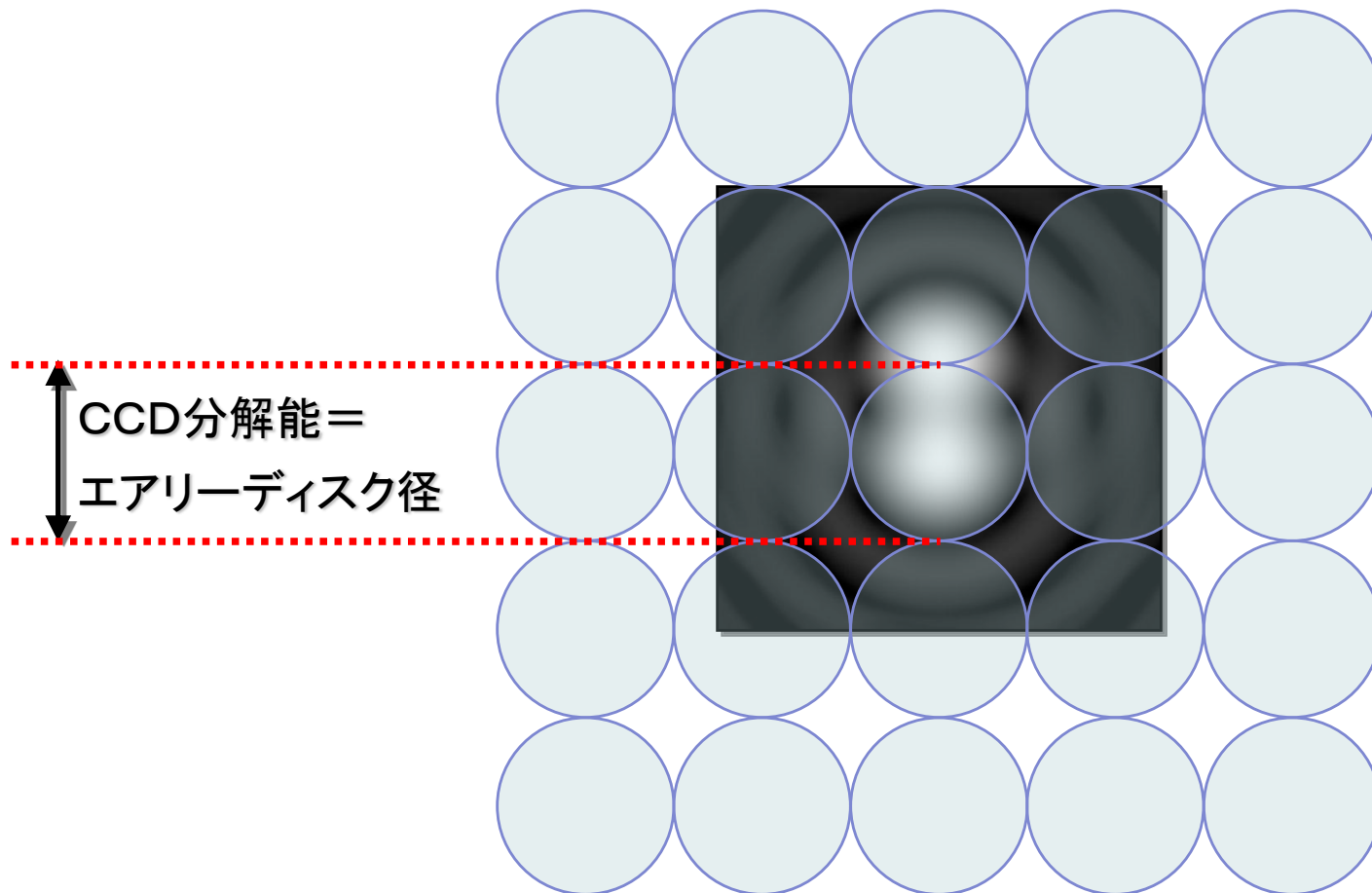
- CCD分解能とエアリーディスク径が一致している状態
 - これ以上エアリーディスクが大きくなると小絞りボケが生じ始める
 - マイクロレンズや開口部、干渉リングなども関係するので厳密ではない



- 結像面で分離できるぎりぎりの距離の2点を考える
 - つまりエアリーディスク半径分だけ離れている点
- この2点をCCD上でも2点に分離したい場合

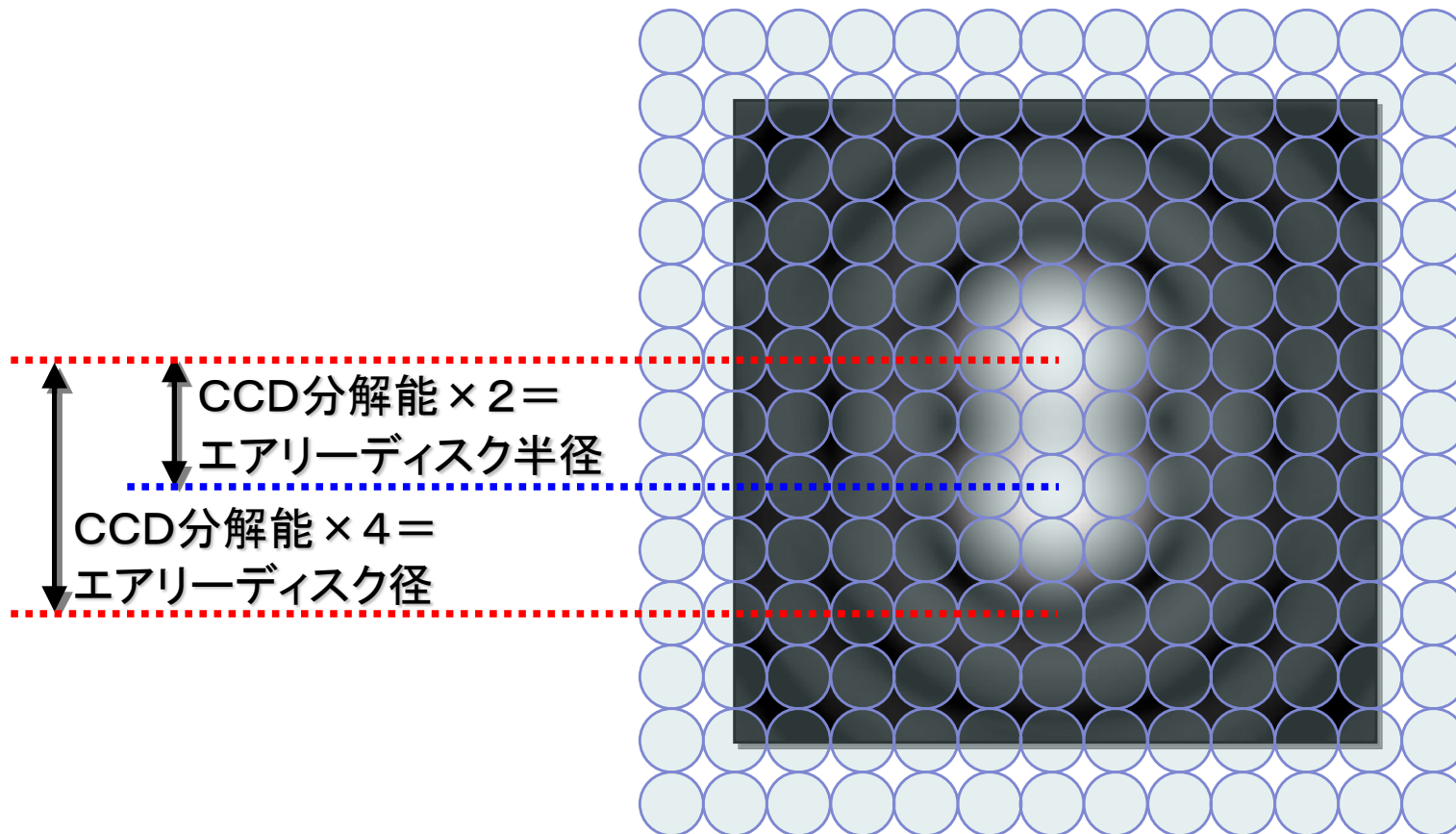


- CCD分解能とエアリーディスク径が一致している状態
 - 結像面上で分離可能な2点をCCD上では分離できていない

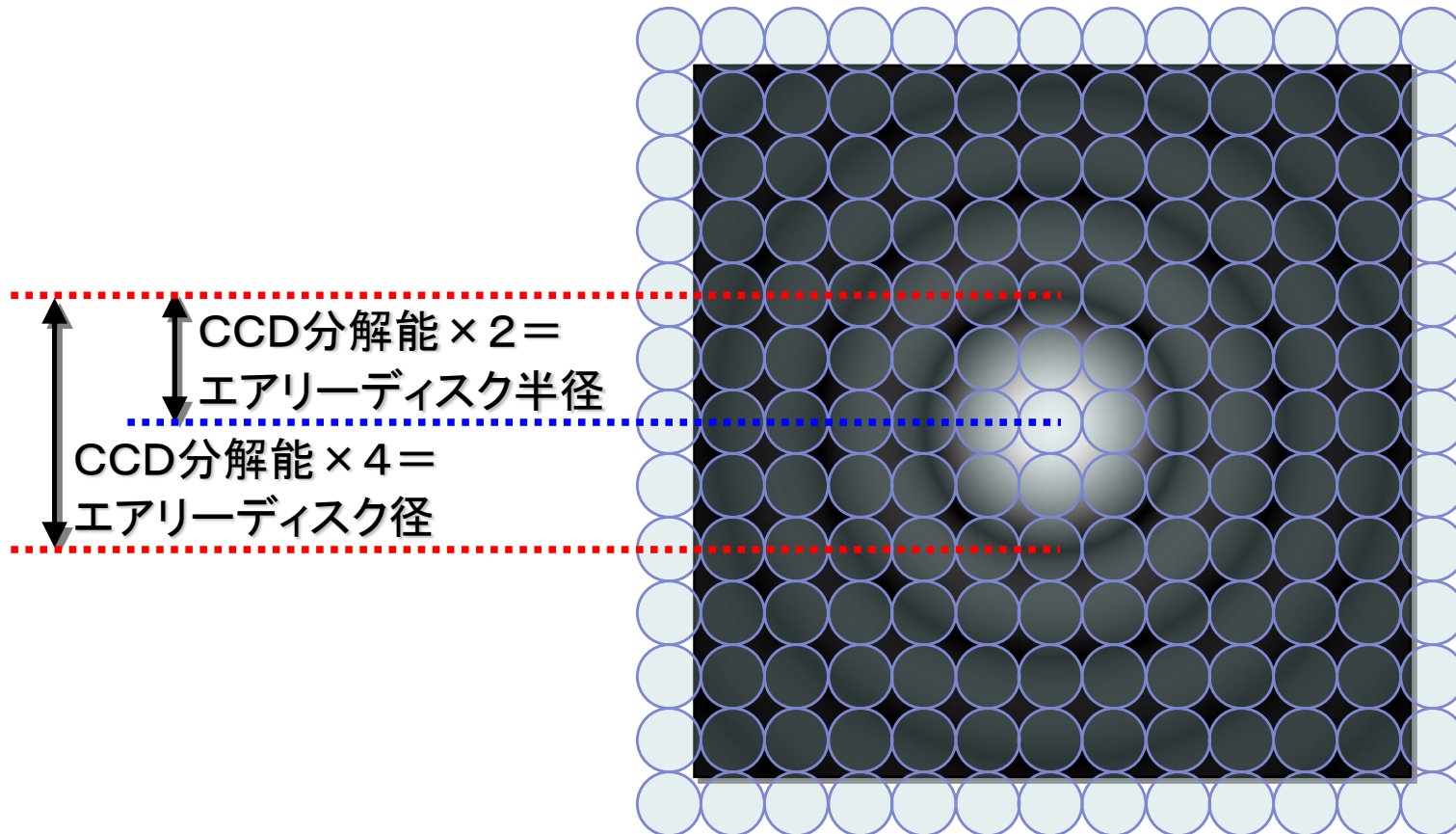


エアリーディスク径とセンサの分解能

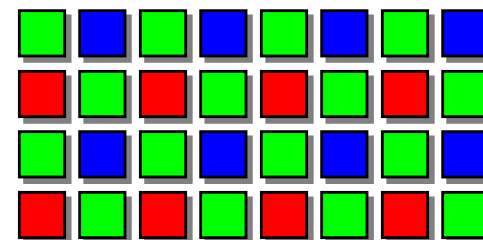
- CCD分解能がエアリーディスク半径(結像での分解能)の $\frac{1}{2}$
 - 結像面で分離できる点像をCCD上でも分離させるためには必要
 - エアリーディスクの半径分だけ離れた2点を分離できるCCD分解能
 - **空間周波数の2倍のサンプリング**



- CCD分解能がエアリーディスク半径(結像での分解能)の $\frac{1}{2}$
 - エアリーディスク径の $\frac{1}{4}$
 - この辺りまでならCCD分解能の向上も無意味ではないということ
 - ただしこの状態ではすでにかなりの小絞りボケが生じている



- 放送用カメラの標準的なフォーマットの場合
 - CCDサイズ
 - 2/3"型 (8.8×6.6mm あるいは 9.6×5.4mm: 対角11mm)
 - 一部の放送用カメラは3板方式
 - 画素毎にRGBの3センサをもつ
 - ここまでに考察したとおり
- カラーフィルタ(原色フィルタ)を用いた単板式
 - 一般的なカメラ
 - CCDは一枚でRGBで画素を共有
 - 各画素はベイヤ型配列等のカラーフィルタで原色化される
 - 全画素の半分を緑が占める
 - 人間は明るさや解像度を緑で強く認知するため
 - 赤／青の画素数は各1/4ずつとなる
 - 補色フィルタの場合はまた異なる
 - 実質的な分解能はおおよそ 0.8 倍程度
 - ピクセルの補間処理などを総合的に考慮
 - 1000×1000なら実質800×800程度とみなせる



ベイヤ型配列

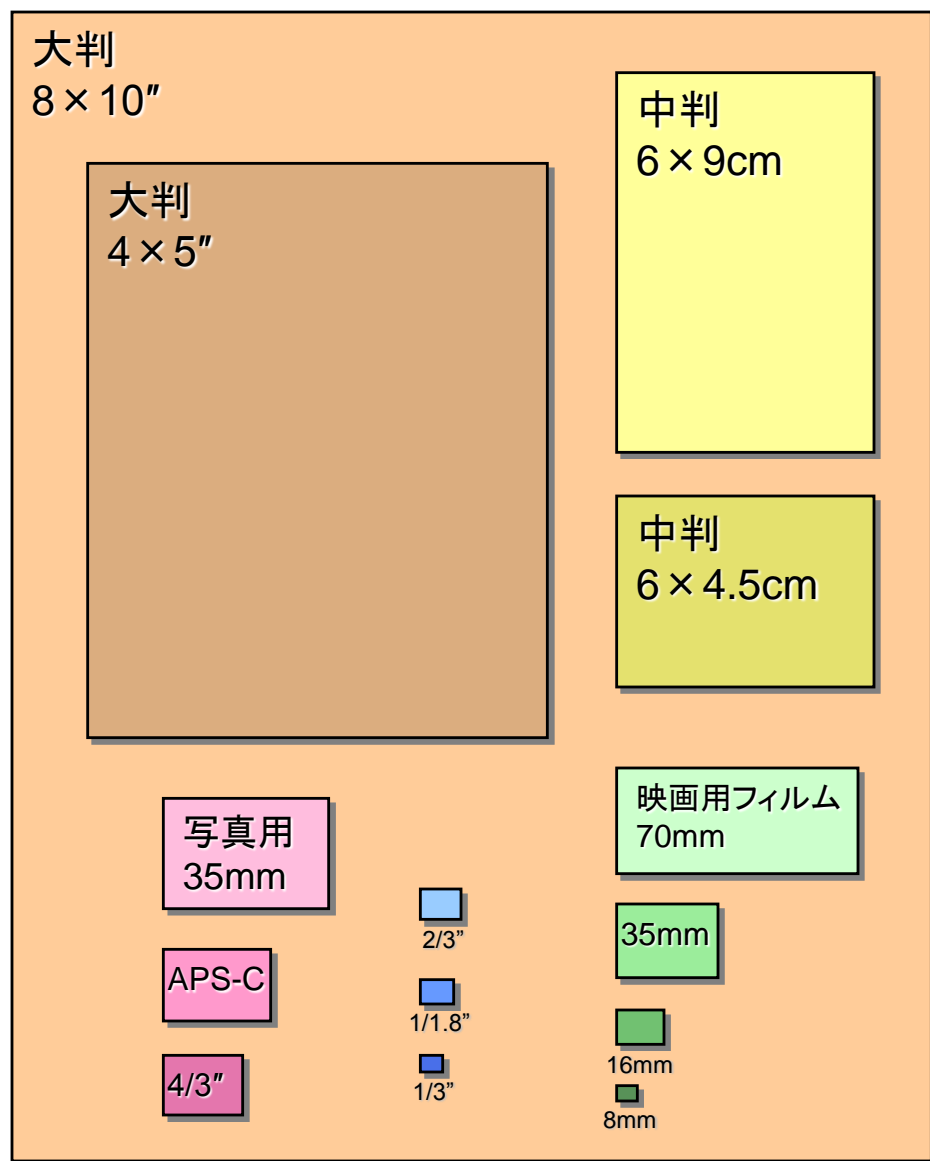
- 仮にフルHD単板式とすると
 - 1,920 × 1,080 ベイヤ型画素配列
 - 実質的な解像度は 1,536 × 864 程度とみなせる
 - 2/3"型 (9.6 × 5.4mm) の分解能は
 - 5.4mm / 864 = 0.00625mm = 6.25 μ m
 - 縦を基準に計算しているが横方向 (9.6mm / 1,536) でも同じ
 - CCDの分解能は約 6.25 μ m 程度とみなせる

- 回折限界
 - エアリーディスク径 ($d = 2.4392\lambda Fe / n$) が $6.25\mu\text{m}$ 程度
 - エアリーディスク径が $6.25\mu\text{m}$ より小さければ1画素内に集光できる
 - シャープに撮像できる
 - これより大きくなると小絞りボケが発生する
- エアリーディスク径が $6.25\mu\text{m}$ 未満になる実効F値を計算
 - 波長パラメタ
 - 最終画像で無視できない影響力をもつ長波長色
 - ここでは $\lambda = 0.6\mu\text{m}$ (600 nm) と仮定 (おおよそオレンジ色付近)
 - エアリーディスク径
 - $d = 2 \times 1.2196\lambda Fe / n$
 - $2.4392 \times 0.6\mu\text{m} \times Fe / 1.0 < 6.25\mu\text{m}$
 - $Fe < 6.25\mu\text{m} / (2.4392 \times 0.6)$
 - $Fe < 4.27$
 - 実効F値 4.3 程度が回折限界
 - これより絞ると小絞りボケが生じ始める

- 2/3"型CCDでフルHD(9.6×5.4mm:対角11mm)
 - 実効F値 4.3 程度が回折限界
 - 3板方式のカラーカメラではもう少し厳しい
 - $5.4\text{mm} / 1,080 = 0.005\text{mm} = 5\mu\text{m}$ 程度
 - $2.4392 \times 0.6\mu\text{m} \times \text{Fe} / 1.0 < 5\mu\text{m}$
 - $\text{Fe} < 3.42$
 - 実効F値 3.4 程度で限界となる
- 放送用カメラのレンズは開放絞りが f/4~5 程度
 - 超望遠ズームカメラなどでそのくらい
 - フルHDでは開放絞りでぎりぎり

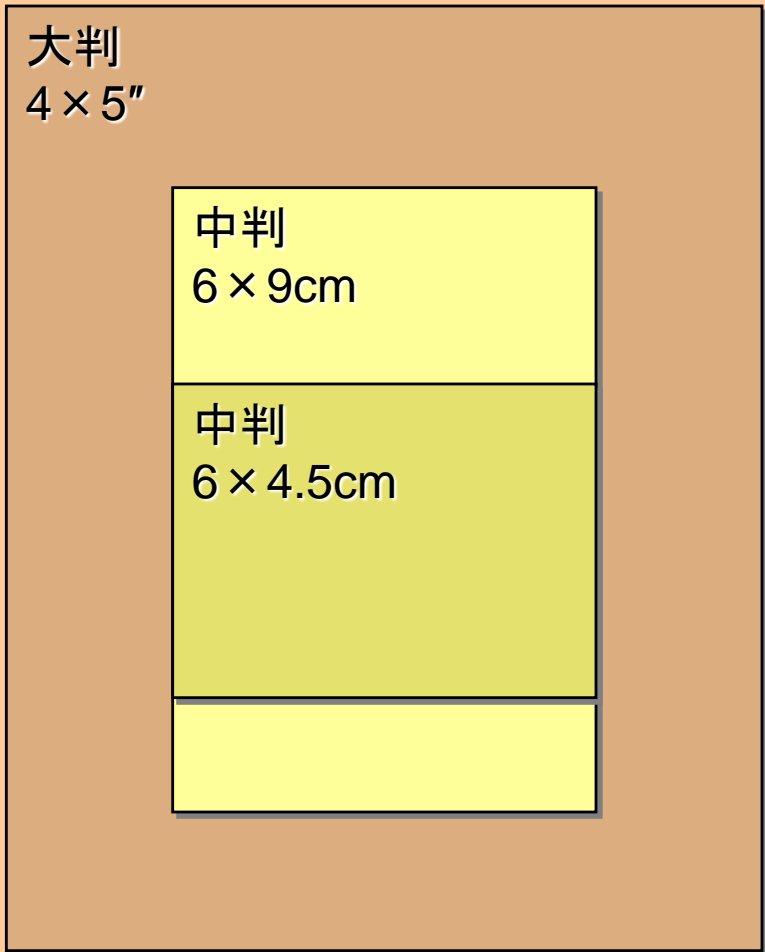
さまざまな撮像フォーマットの有効サイズ

大判カメラ用	幅	高さ	対角長
8×10"	200 mm	250 mm	320 mm
4×5"	100 mm	125 mm	160 mm
中判カメラ用	幅	高さ	対角長
6×9cm	56.0 mm	82.6 mm	99.8 mm
6×4.5cm	56.0 mm	41.5 mm	69.7 mm
写真(一眼レフ)用	幅	高さ	対角長
35mm	36.0 mm	24.0 mm	42.27 mm
APS-C	23.4 mm	16.7 mm	28.3 mm
4/3" (フォーサーズ)	17.3 mm	13.0 mm	21.13 mm
映画用フィルム	幅	高さ	対角長
70mm	52.5 mm	23.0 mm	57.32 mm
35mm	22.0 mm	16.0 mm	27.20 mm
16mm	10.26 mm	7.49 mm	12.70 mm
8mm	4.5 mm	3.3 mm	5.58 mm
コンパクトデジカメ用	幅	高さ	対角長
2/3"型	8.8 mm	6.6 mm	11.07 mm
1/1.8"型	7.18 mm	5.32 mm	8.93 mm
1/2.5"型	5.76 mm	4.29 mm	7.18 mm
1/3"型	4.8 mm	3.6 mm	6.0 mm



A4印刷用の実寸サイズ

大判(本来は縦向き)
8×10"



映画用フィルム
70mm

35mm

16mm

8mm

写真用
35mm

APS-C

4/3"

2/3"

1/1.8"

1/3"

イメージセンサ分解能と実効F値

- 高解像度なデジタルカメラの回折限界
 - 各CCDサイズの現状でのおおよそ最大の解像度で比較
 - コンパクトデジカメでは開放絞りですら回折限界を超えていることが判る
 - このことだけから高解像度CCDが無意味とはいえない
 - 集光限界の4倍程度までは意味がある
 - ただしシャープな撮像を得られるのは最大画素数の1割以下から半分程度まで

デジタル一眼レフ レンズ依存だが開放F値は おおよそ f/1.4~5.6 程度が主流	CCD センサ幅	CCD センサ高	CCD 横解像度	CCD 縦解像度	CCD 分解能	回折限界の 実効F値
35mm フルサイズで 2400万画素	36.0 mm	24.0 mm	6000	4000	7.50 μm	Fe < 5.12
APS-C サイズで 1200万画素	23.4mm	15.6 mm	4200	2800	6.96 μm	Fe < 4.77
4/3"型 (フォーサーズ) で 1000万画素	17.3 mm	13.0 mm	3600	2700	6.02 μm	Fe < 4.11
コンパクトデジカメ 機種依存だが開放F値は おおよそ f/2.6~5.9 程度	CCD センサ幅	CCD センサ高	CCD 横解像度	CCD 縦解像度	CCD 分解能	回折限界の 実効F値
2/3"型で 1100万画素	8.8 mm	6.6 mm	3800	2850	2.89 μm	Fe < 1.98
1/1.8"型で 1200万画素	7.18 mm	5.32 mm	4000	3000	2.17 μm	Fe < 1.48
1/2.33"型で 1450万画素	6.13 mm	4.6 mm	4400	3300	1.74 μm	Fe < 1.19
1/2.5"型で 1200万画素	5.76 mm	4.29 mm	4000	3000	1.79 μm	Fe < 1.22

銀塩フィルムの画素数換算

- 一概に画素数に換算することはできない
 - 銀塩フィルムの結晶は大きさも間隔もまちまち
 - 許容錯乱円から解像度に換算するのは間違いなので注意
 - 許容錯乱円はあくまで用途に応じて許容できる大きさ(フィルムの分解能とは無関係)
- 多くの説があるが...
 - 35mm フィルムでおおよそ800万画素相当以上になる

大判カメラ用フィルム	幅	高さ	デジタル換算画素数
8×10"	200 mm	250 mm	約5億9,259万画素以上
4×5"	100 mm	125 mm	約1億1574万画素以上
中判カメラ用フィルム	幅	高さ	デジタル換算画素数
6×9cm	56.0 mm	82.6 mm	約4,283万画素以上
6×4.5cm	56.0 mm	41.5 mm	約2,152万画素以上
写真用フィルム	幅	高さ	デジタル換算画素数
35mm	36.0 mm	24.0 mm	約800万画素以上
APS-C	23.4 mm	16.7 mm	約362万画素以上
映画用フィルム	幅	高さ	デジタル換算画素数
70mm	52.5 mm	23.0 mm	約1,118万画素以上
35mm	22.0 mm	16.0 mm	約326万画素以上
16mm	10.26 mm	7.49 mm	約72万画素以上
8mm	4.5 mm	3.3 mm	約14万画素以上

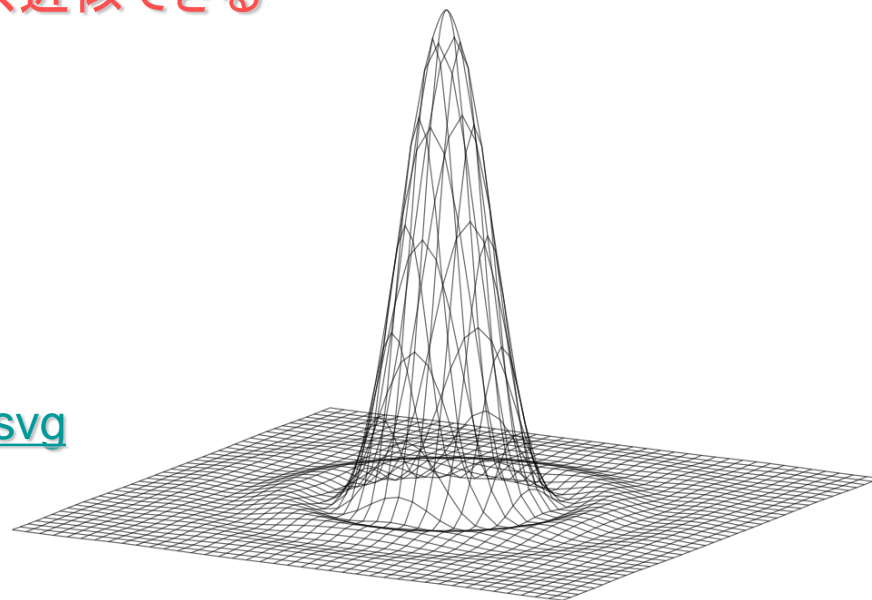
35mm銀塩フィルムの回折限界は？

- 36 × 24mm: 対角43mmで単版式800万画素相当
 - 3板方式の512万画素相当とみなすと平均的な分解能は
 - 7.7 μ m 程度
 - $2.4392 \times 0.6\mu\text{m} \times \text{Fe} / 1.0 < 7.7\mu\text{m}$
 - $\text{Fe} < 5.26$
 - 実効F値 5.3 程度が1点に集光できる限界となる
 - あくまで画素が一定サイズであるとの仮定の下で計算した場合
- 許容錯乱円から計算した場合(実用的な値)
 - 35mm フィルムの許容錯乱円は 0.026~0.035mm 程度
 - 一般的なプリントサイズなどが考慮された典型的な値
 - $2.4392 \times 0.6\mu\text{m} \times \text{Fe} / 1.0 < 26 \sim 35\mu\text{m}$
 - $\text{Fe} < 17.7 \sim 23.9$
 - 実効F値 18~24 程度が実質的な回折限界となる
 - これより絞るとエアリーディスク径が許容錯乱円を超える

- 干渉（ディフラクション）リングは現状では困難
 - これが可能ならグレアもシミュレーションできる
- 中央のエアリーディスク
 - エアリーディスクの形状は正規分布に近い
 - ガウシアンブラーで精度よく近似できる

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Airy-3d.svg>

From Wikipedia, the free encyclopedia

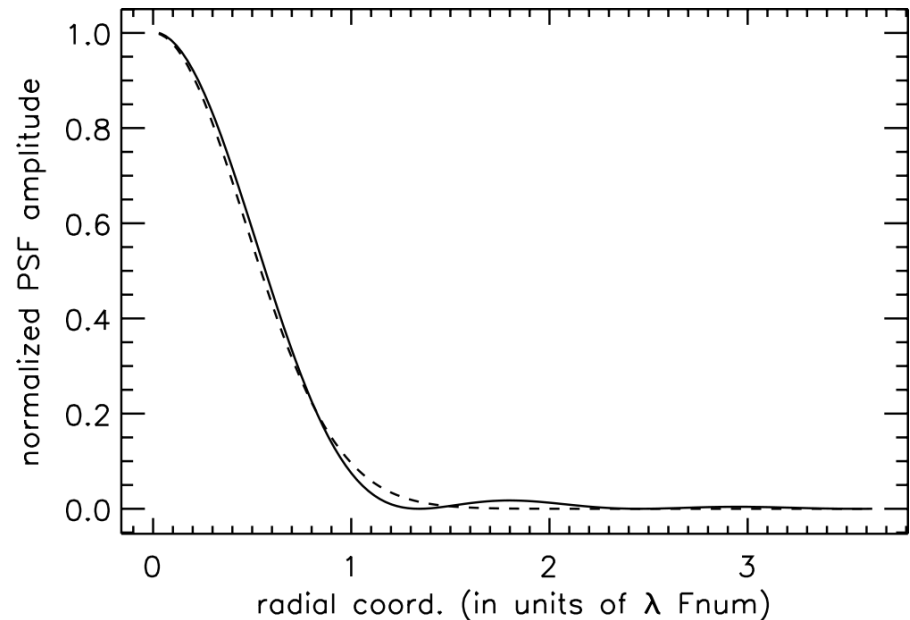


- ガウス半径の計算

- $\sigma = 0.42\lambda F\#$

- $\sigma = d \times 0.17219$

- σ は標準偏差
 - d はエアリーディスク径
 - $d = 2 \times 1.2196\lambda F\#$
 - λ は光(電磁波)の波長



A radial cross-section through the Airy diffraction pattern (solid curve) and its Gaussian profile approximation (dashed curve).

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Airy_vs_gaus.svg

From Wikipedia, the free encyclopedia

- エアリーディスク径は波長に比例
 - 赤の半径がもっとも大きい
 - 輪郭がわずかに赤っぽく見える
 - RGBそれぞれの波長で計算した半径を利用
 - 色空間に注意
 - CIE RGB等色関数の原色の波長を使わないこと
 - » $\lambda_{rgb} = (700.0\text{nm}, 546.1\text{ nm}, 435.8\text{ nm})$
 - 普通に波長を検索すると頻出するので注意
 - » 一般的な写真に関わる波長とは大きく異なる
 - 一般的な感光／表示に関与する波長から総合的に判断
 - ここでは $\lambda_{rgb} = (614.5\text{nm}, 532.5\text{ nm}, 467.5\text{ nm})$ を採用

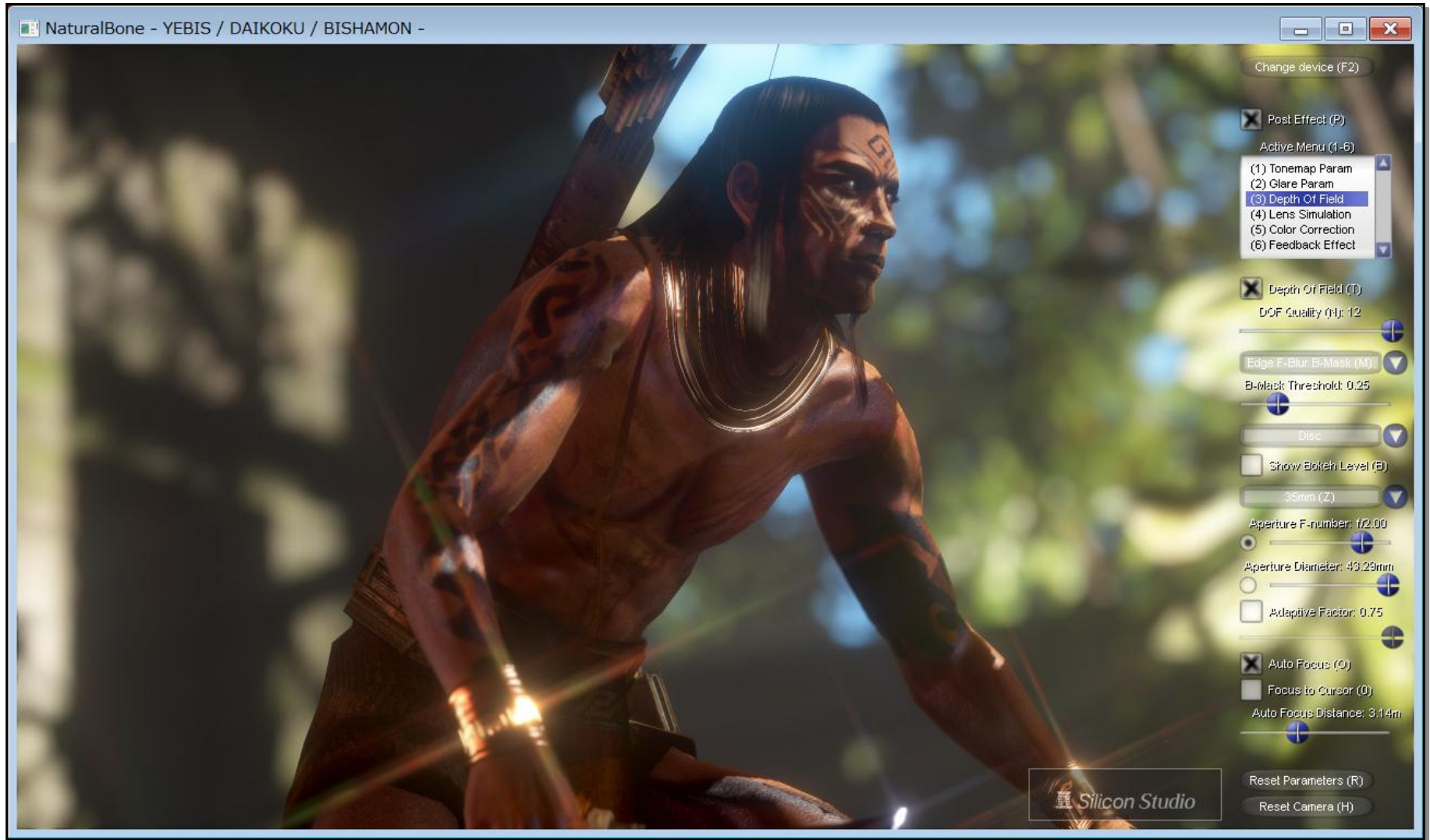
- エアリーディスク径は波長に比例
 - ガウスブラー時の各サンプリング
 - 重みだけをRGBそれぞれで計算する
 - サンプリングはRGB共通で行う
 - サンプル数は増えないためGPU負荷は増加しない
 - バイリニアサンプルではわずかに誤差が発生する
 - » 実用上はまったく問題にならない程度
 - ポイントサンプルにすれば誤差は一切発生しないが効率が良くない
 - » 同じ半径のブラーにおおよそ倍のサンプリングが必要

- ブレンダー半径が大きい場合は縮小バッファを利用
 - ブレンダー半径によって最適なサイズで適用
 - サイズ切り替わり部分は2レベルの結果をブレンド
 - 縮小バッファのレベルを滑らかに切り替える
 - ポッピング防止
 - 通常小絞りボケは小さいため必要性は高くない
 - 汎用的なガウシアンブレンダーの実装としてはかなり有用
 - あらゆるサイズのガウシアンブレンダーを高速に適用できる
 - 若干誤差が発生するが実用上はほとんど無視できる程度

- 35mm フィルムサイズ (対角42.27mm)
 - f/2, f/4, f/8, f/16, f/32, f/64, f/128
- 1/2.5"型CCDサイズ (対角7.18mm)
 - f/2, f/4, f/8, f/16, f/32, f/64, f/128
- 画像解像度は 1280 × 720
 - 約92万画素
 - 単版式換算で約140万画素のデジカメ相当とみなせる

35mm f/2

NaturalBone - YEBIS / DAIKOKU / BISHAMON -



Change device (F2)

Post Effect (P)

Active Menu (1-6)

- (1) Tonemap Param
- (2) Glare Param
- (3) Depth Of Field
- (4) Lens Simulation
- (5) Color Correction
- (6) Feedback Effect

Depth Of Field (T)

DOF Quality (H): 12

Edge F-Blur B-Mask (M)

B-Mask Threshold: 0.25

Disc

Show Boken Level (B)

35mm (Z)

Aperture F-number: f2.00

Aperture Diameter: 43.29mm

Adaptive Factor: 0.75

Auto Focus (O)

Focus to Cursor (O)

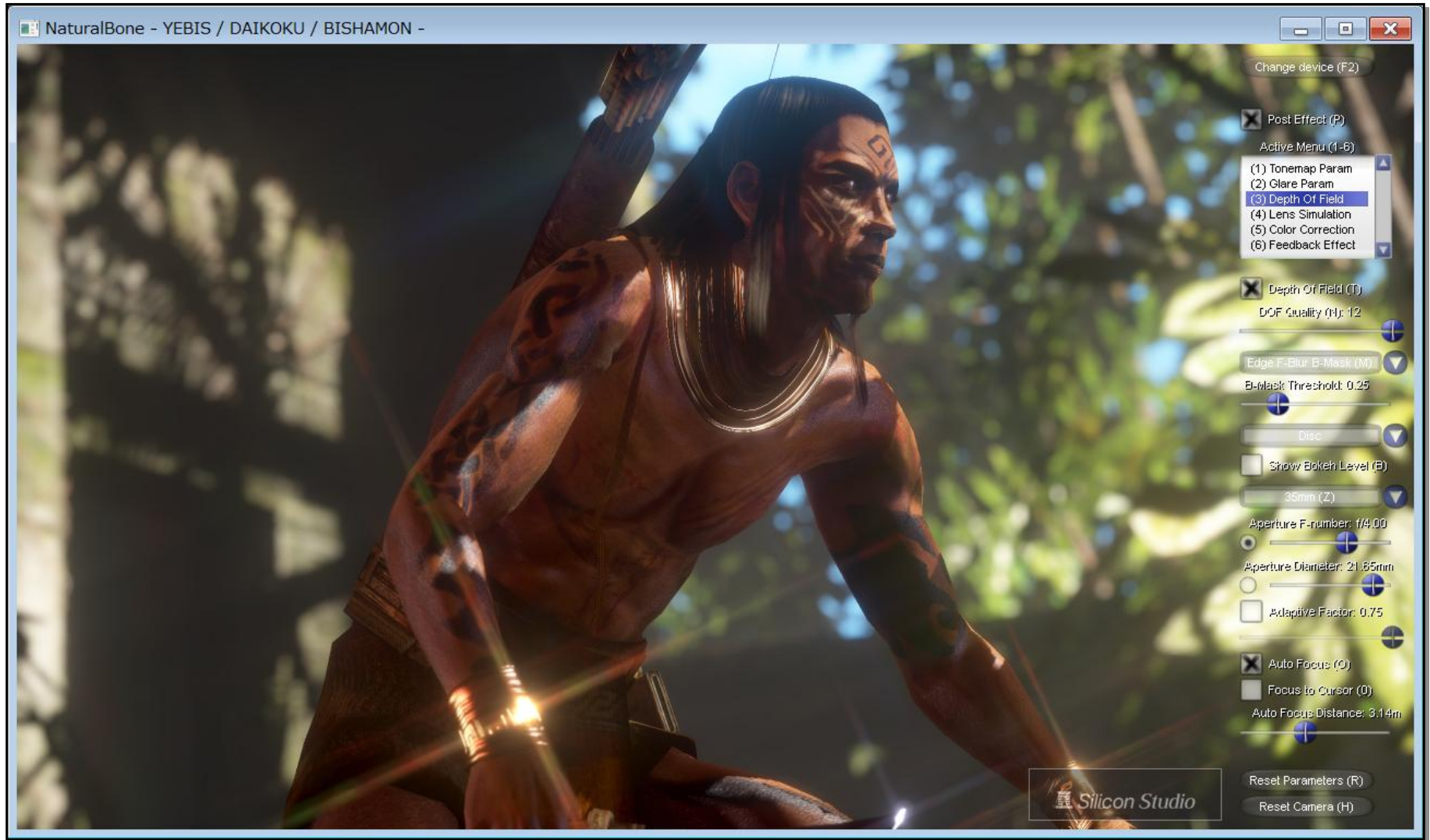
Auto Focus Distance: 3.14m

Reset Parameters (R)

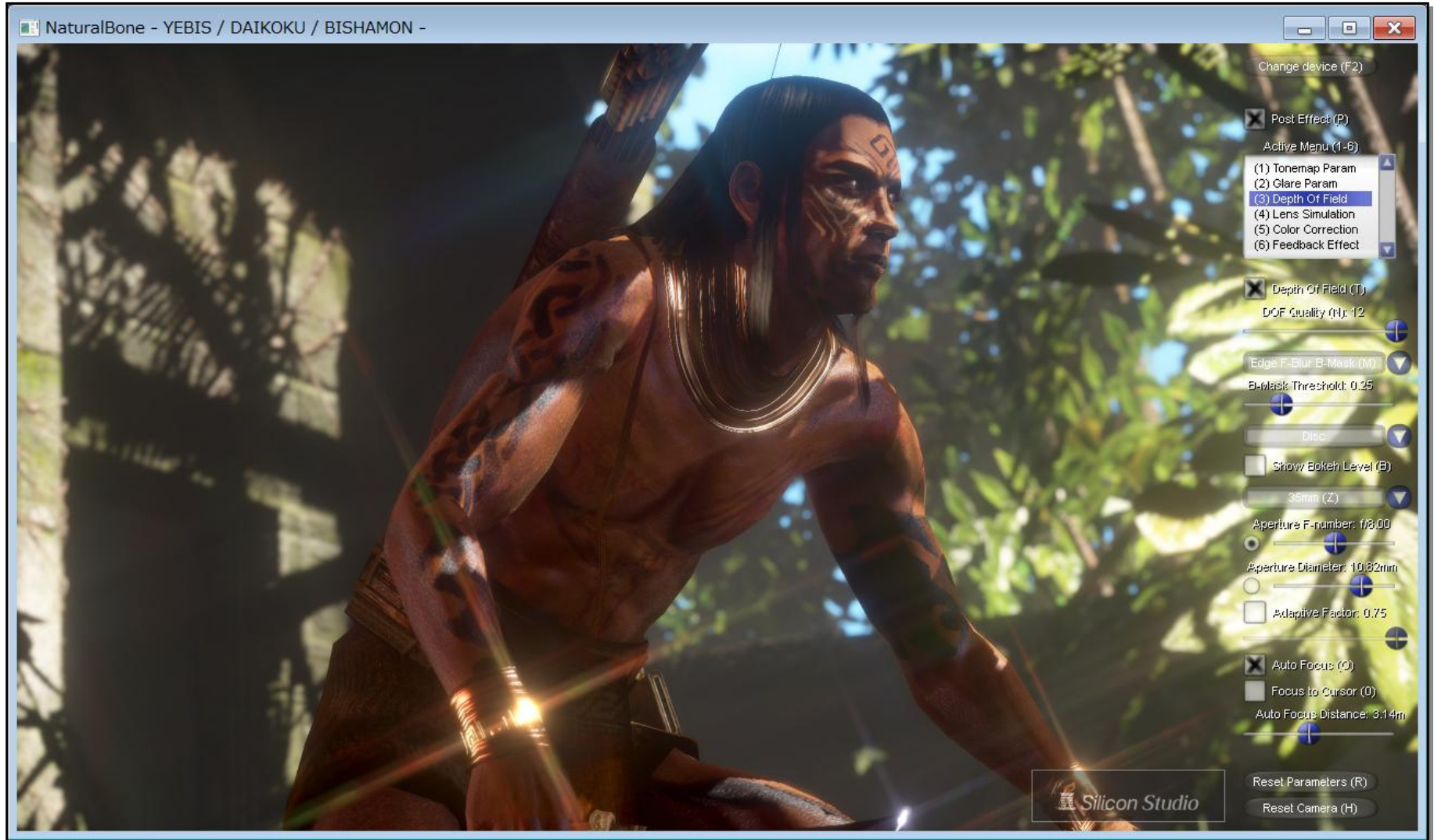
Reset Camera (H)

Silicon Studio

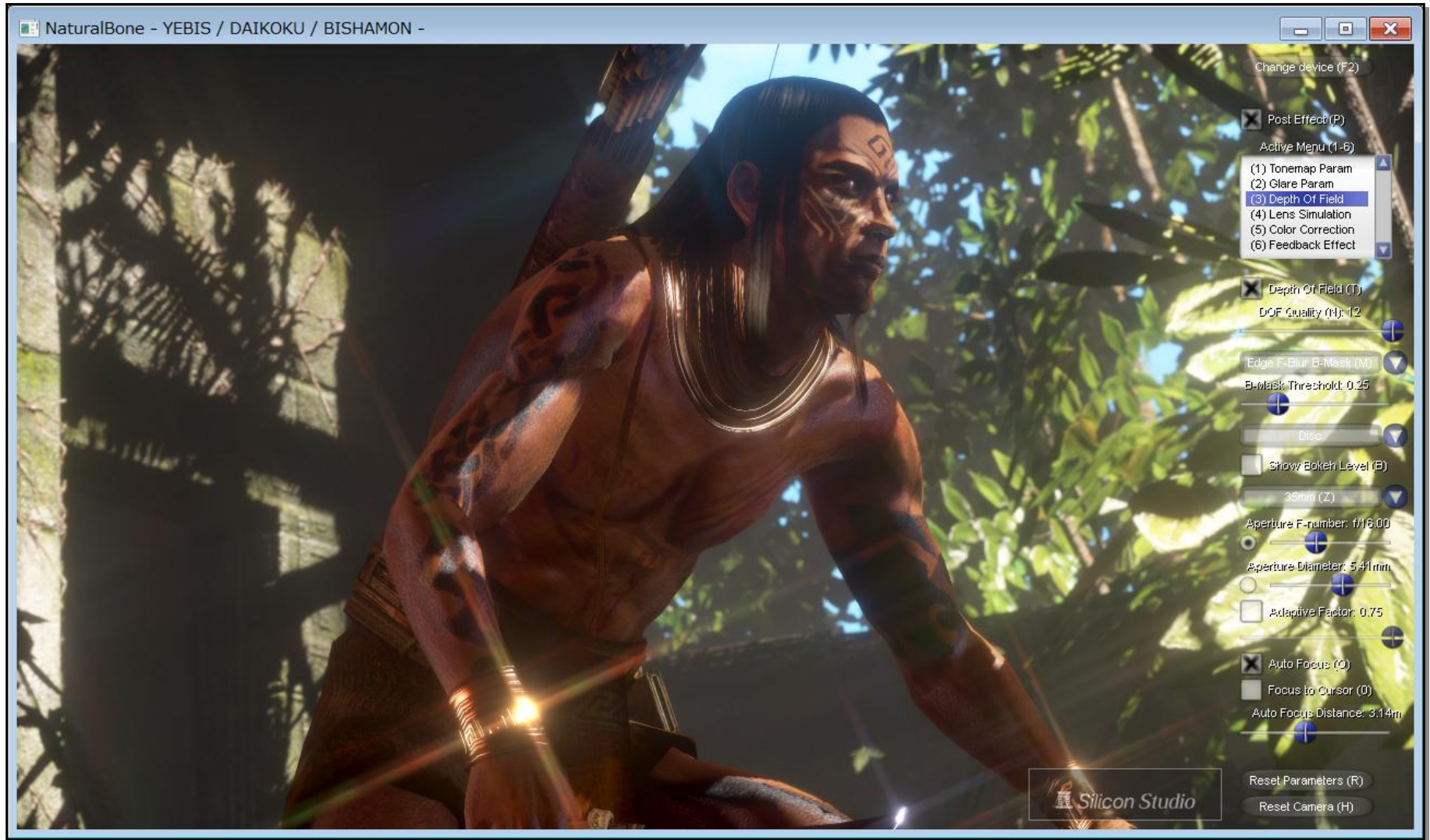
35mm f/4



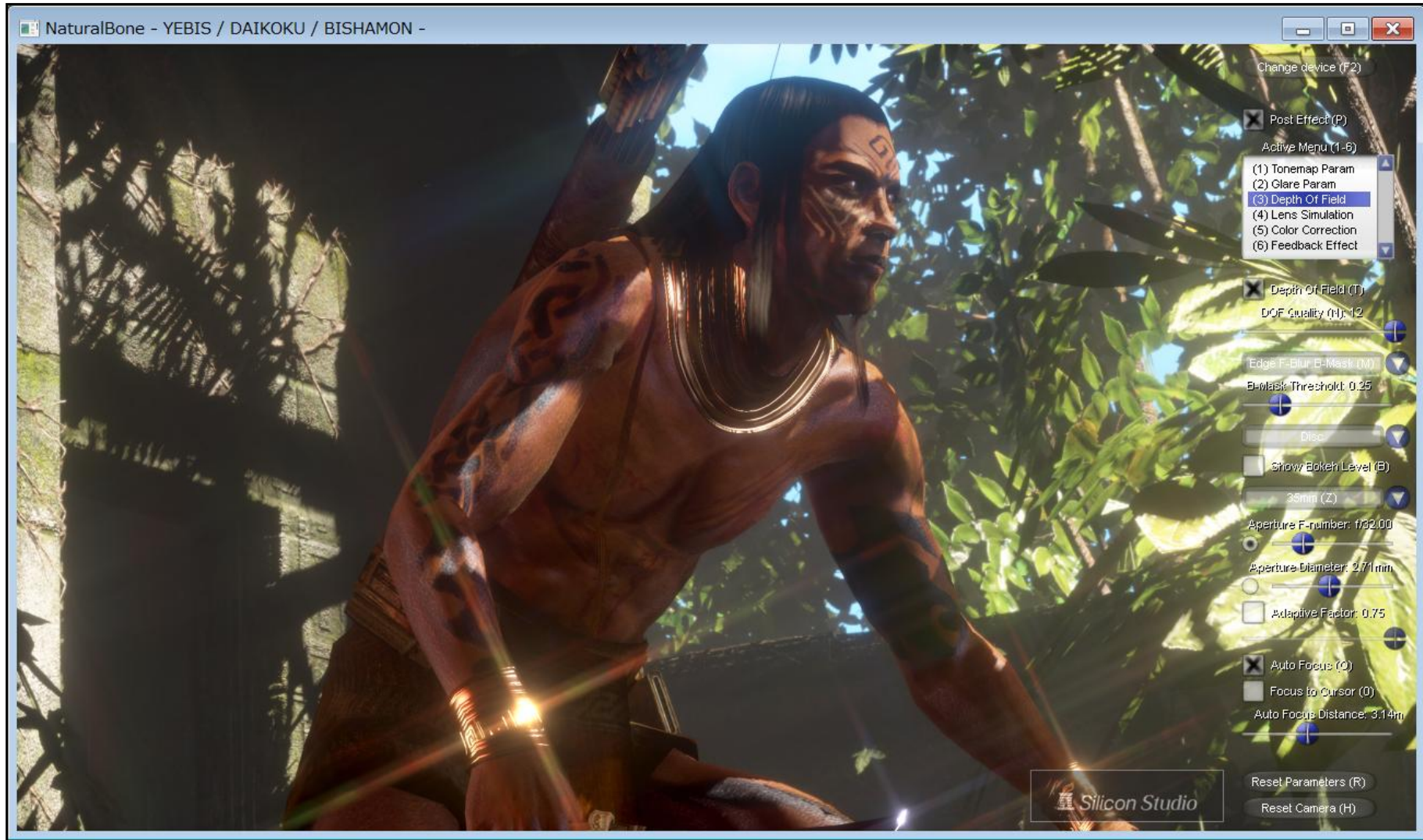
35mm f/8



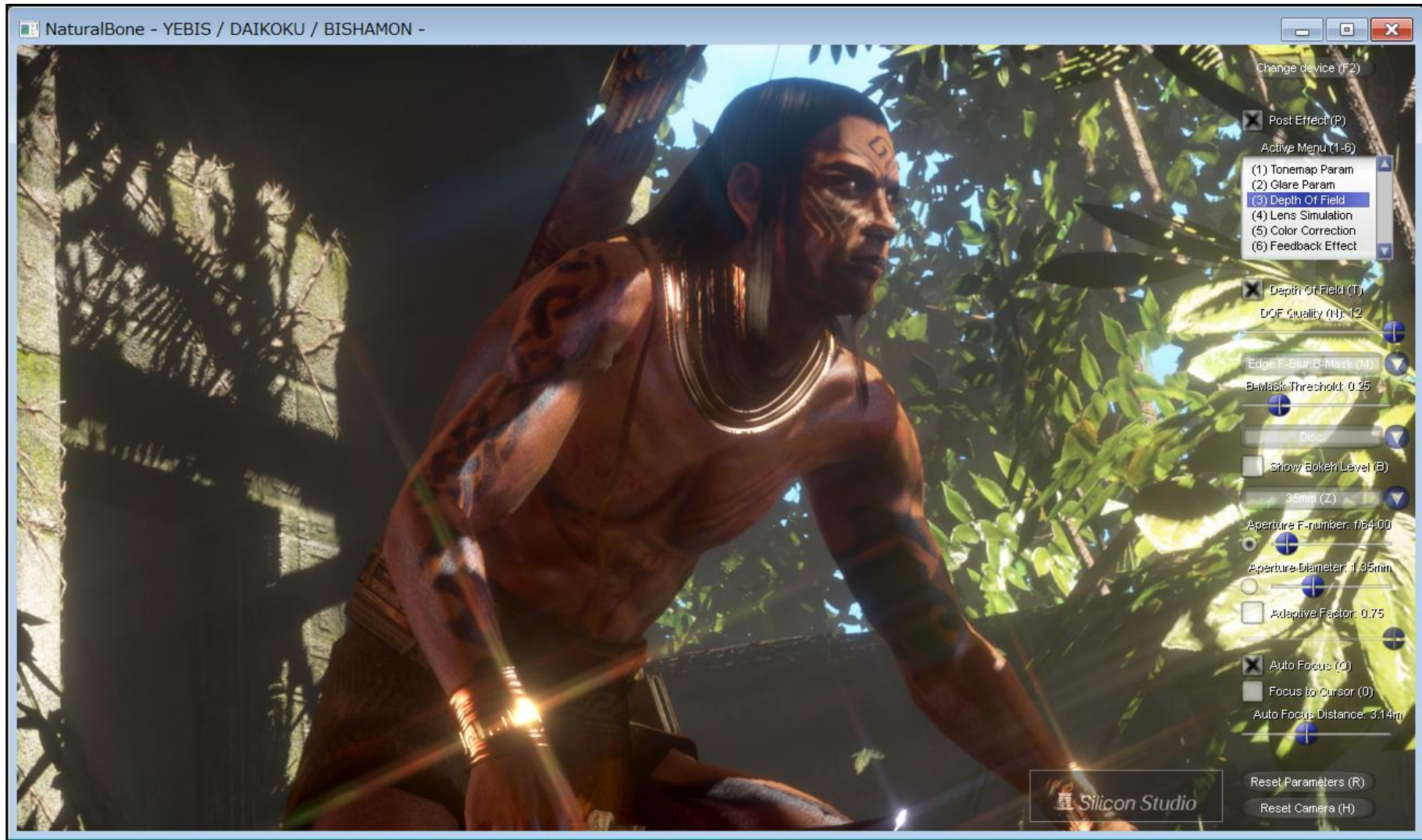
35mm f/16



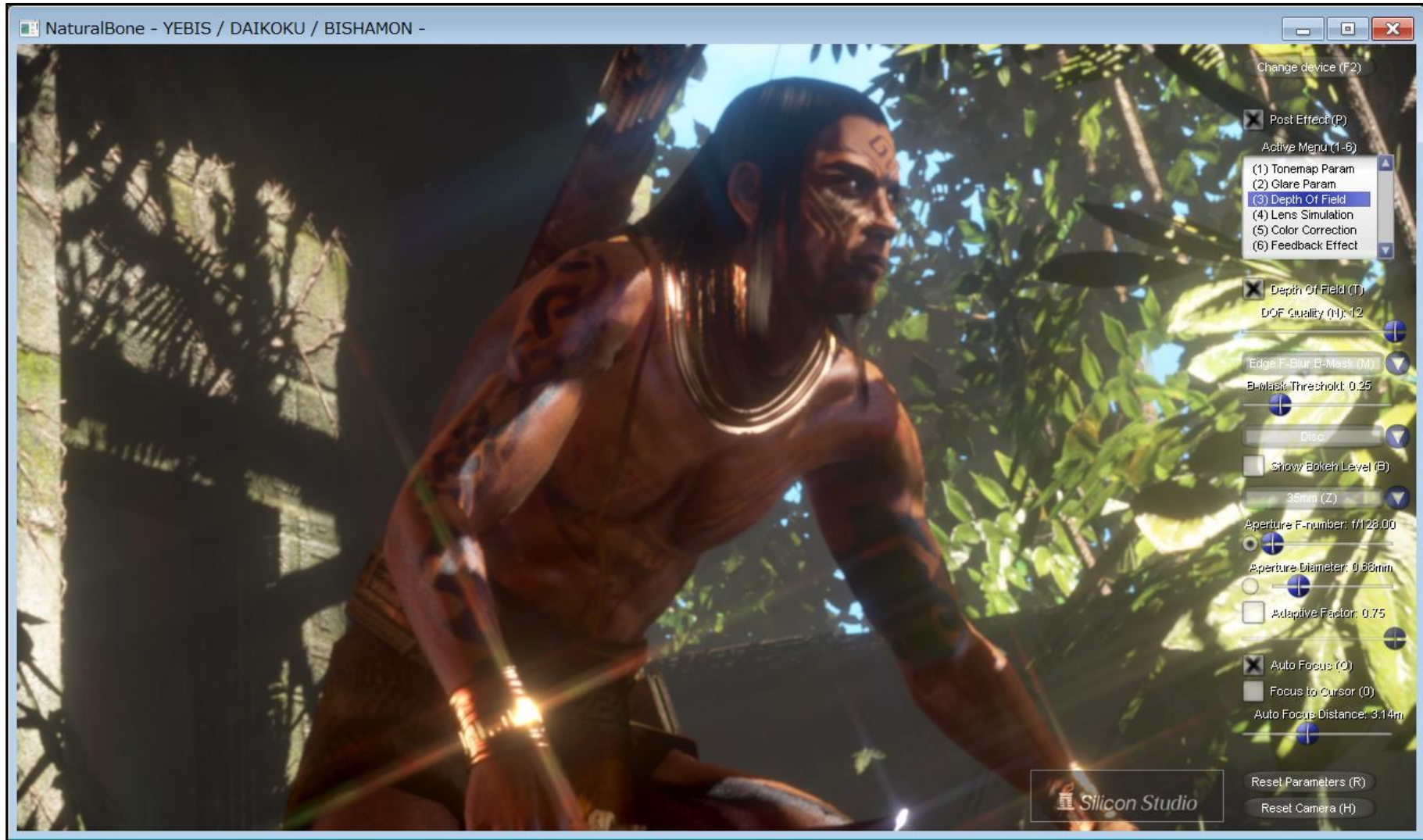
35mm f/32



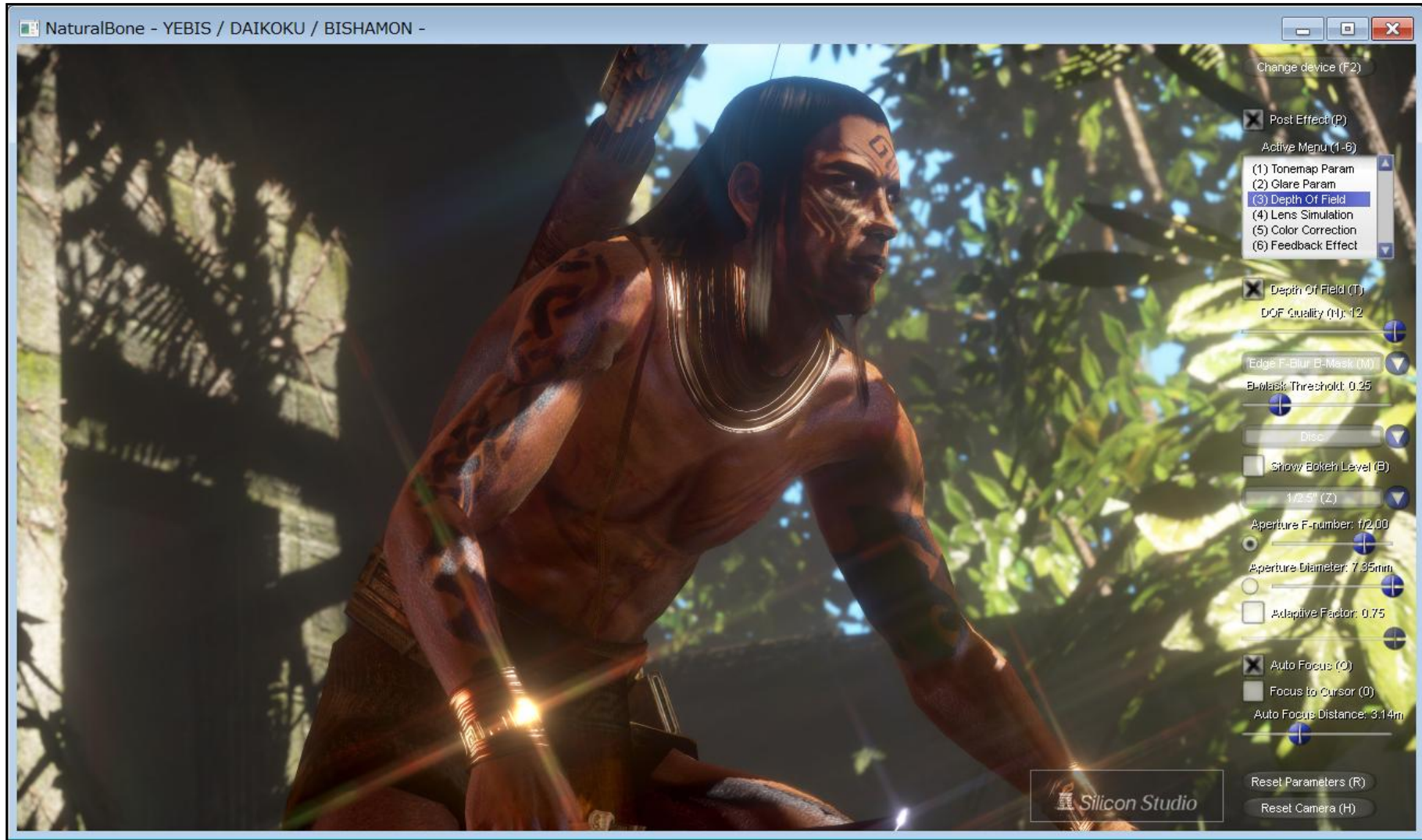
35mm f/64



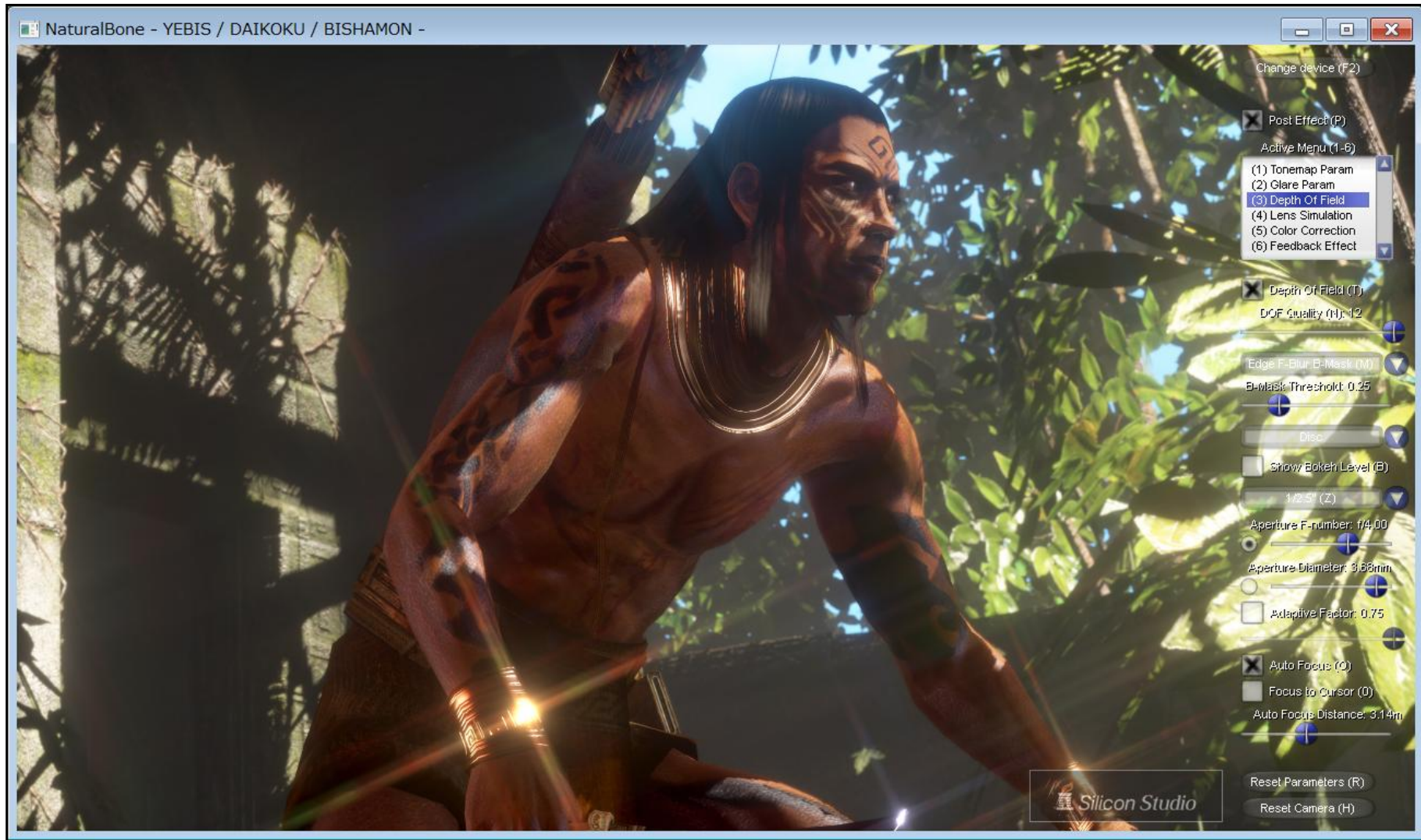
35mm f/128



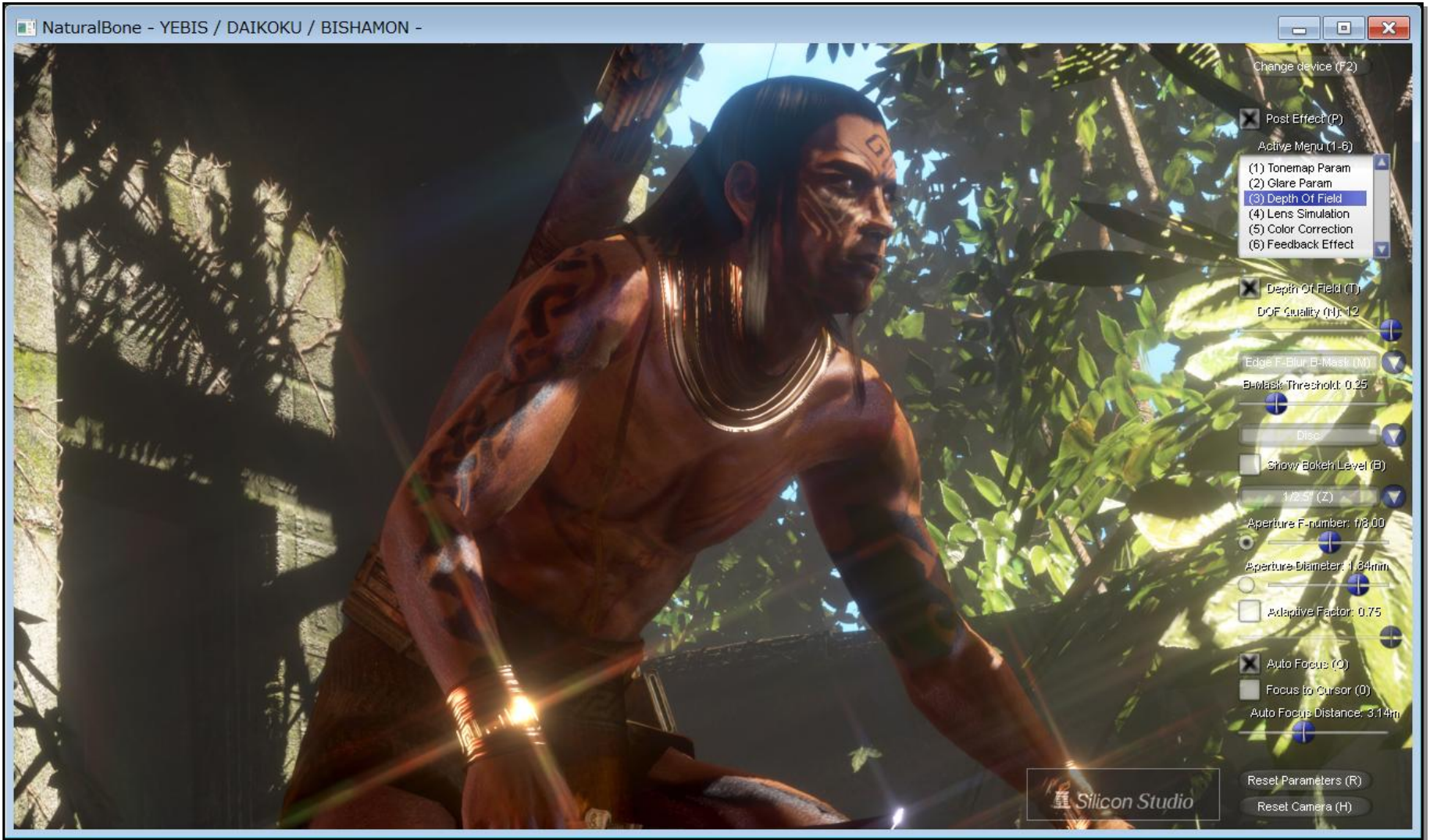
1/2.5" f/2



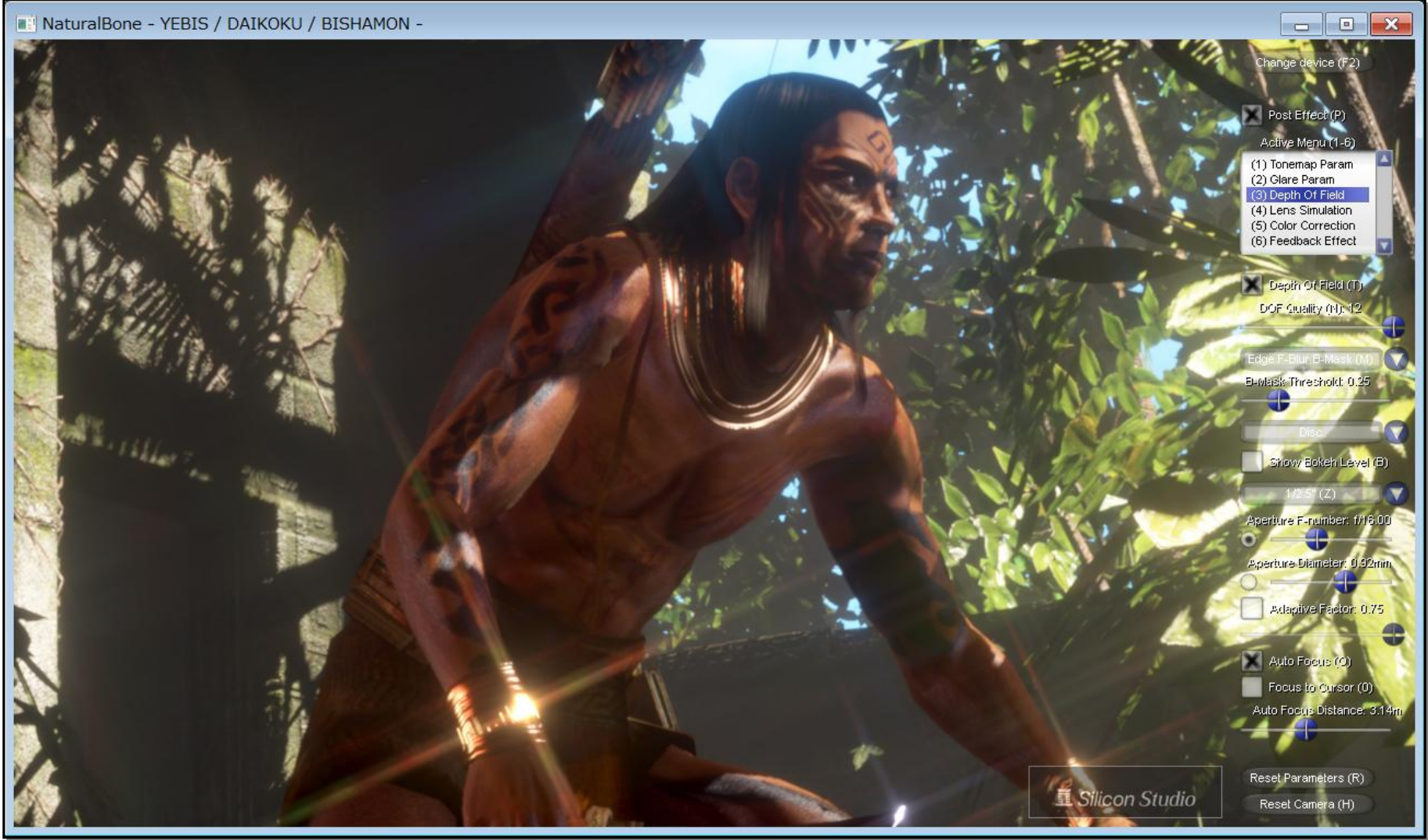
1/2.5" f/4



1/2.5" f/8




1/2.5" f/16



1/2.5" f/32

NaturalBone - YEBIS / DAIKOKU / BISHAMON -



Change device (F2)

Post Effect (P)

Active Menu (1-6)

- (1) Tonemap Param
- (2) Glare Param
- (3) Depth Of Field
- (4) Lens Simulation
- (5) Color Correction
- (6) Feedback Effect

Depth Of Field (T)

DOF Quality (H): 12

Edge F-Blur B-Mask (M)

B-Mask Threshold: 0.25

Disc

Show Boken Level (B)

1/25" (Z)

Aperture F-number: f/32.00

Aperture Diameter: 0.48mm

Adaptive Factor: 0.75

Auto Focus (O)

Focus to Cursor (O)

Auto Focus Distance: 3.14m

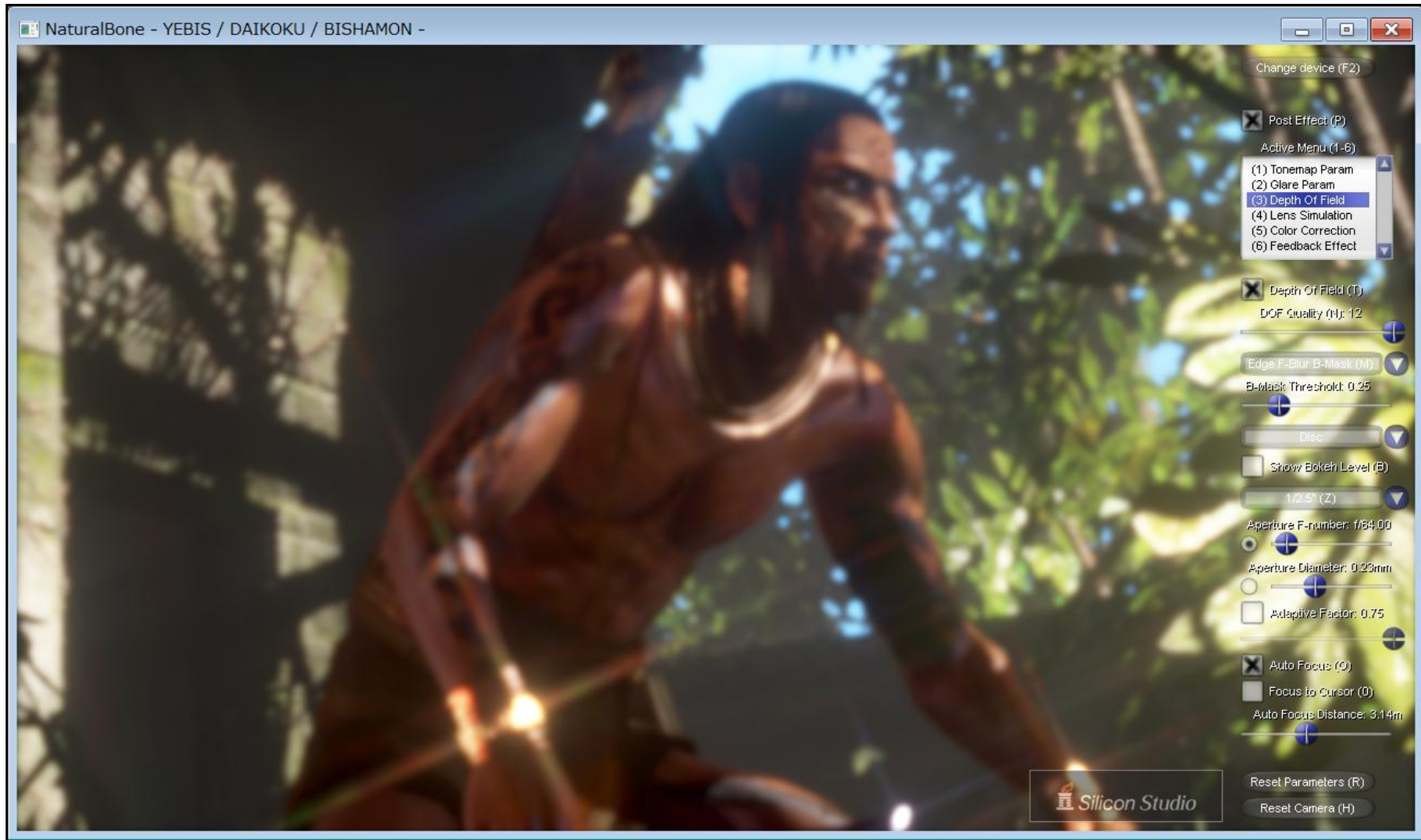
Reset Parameters (R)

Reset Camera (H)

Silicon Studio

1/2.5" f/64

NaturalBone - YEBIS / DAIKOKU / BISHAMON -



Change device (F2)

Post Effect (P)

Active Menu (1-6)

- (1) Tonemap Param
- (2) Glare Param
- (3) Depth Of Field
- (4) Lens Simulation
- (5) Color Correction
- (6) Feedback Effect

Depth Of Field (T)

DOF Quality (H): 12

Edge F-Blur B-Mask (M)

B-Mask Threshold: 0.25

Disc

Show Boken Level (B)

1/2.5" (Z)

Aperture F-number: f/64.00

Aperture Diameter: 0.23mm

Adaptive Factor: 0.75

Auto Focus (O)

Focus to Cursor (O)

Auto Focus Distance: 3.14m

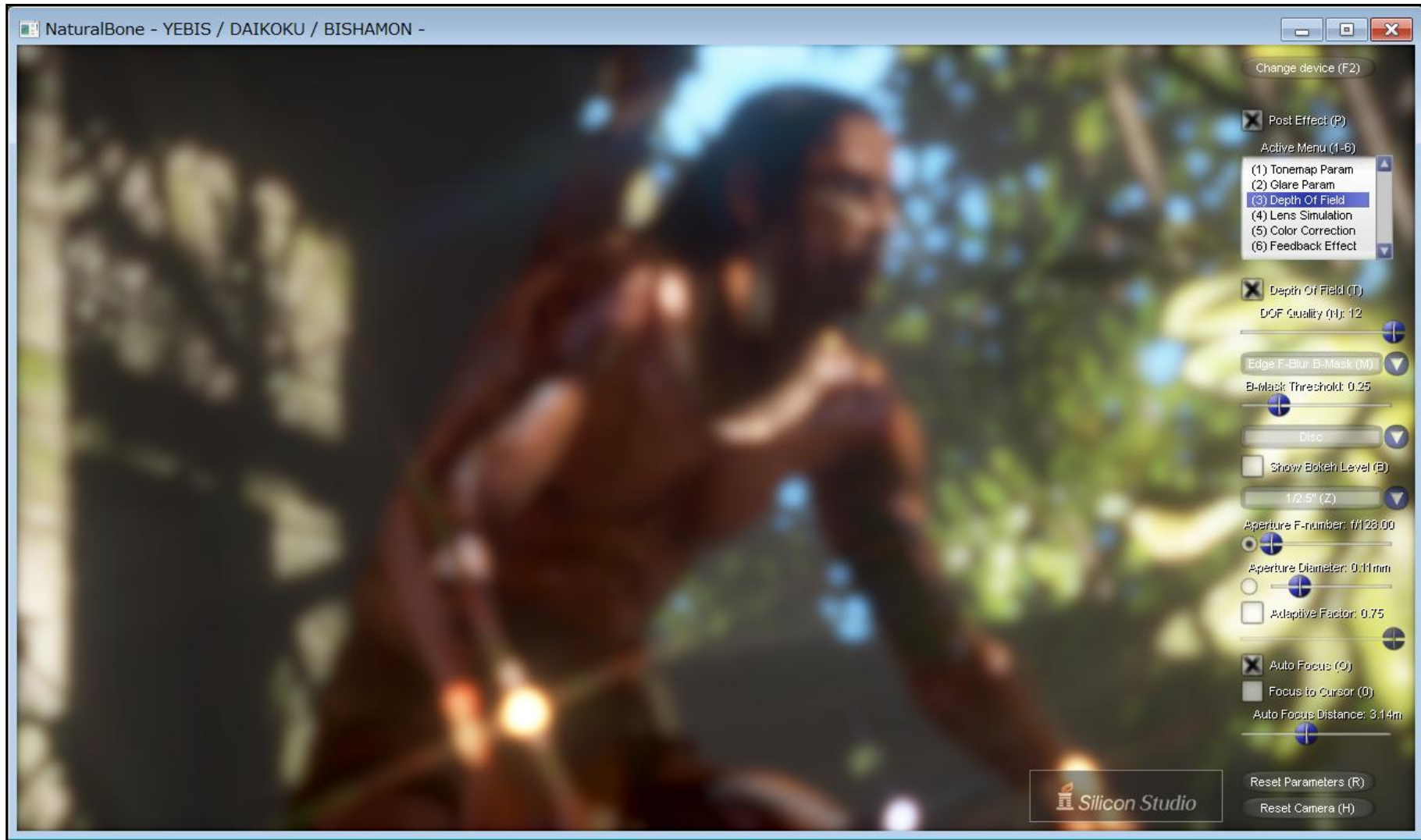
Reset Parameters (R)

Reset Camera (H)

Silicon Studio

1/2.5" f/128

NaturalBone - YEBIS / DAIKOKU / BISHAMON -



Change device (F2)

Post Effect (P)
Active Menu (1-6)
(1) Tonemap Param
(2) Glare Param
(3) Depth Of Field
(4) Lens Simulation
(5) Color Correction
(6) Feedback Effect

Depth Of Field (T)
DOF Quality (H): 12

Edge F-Blur B-Mask (M)
B-Mask Threshold: 0.25

Disc

Show Bokeh Level (B)
1/2.5" (Z)

Aperture F-number: f/128.00
Aperture Diameter: 0.11mm
Adaptive Factor: 0.75

Auto Focus (O)
Focus to Cursor (O)
Auto Focus Distance: 3.14m

Reset Parameters (R)
Reset Camera (H)

Silicon Studio

拡大画像比較

35mm f/2



35mm f/4



35mm f/8



35mm f/16



35mm f/32



35mm f/64



35mm f/128



1/2.5" f/2



1/2.5" f/4



1/2.5" f/8



1/2.5" f/16



1/2.5" f/32



1/2.5" f/64



1/2.5" f/128



エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

CEDEC

CESA Developers Conference

2010

カメラパラメタの設定

- 光学エフェクトの実現の流れ
 - 光学現象などを実装
 - 被写界深度エフェクトなどのランタイムレベルの実装
 - ツールやプラグインを開発
 - アーティストが光学パラメタを設定できるように環境を整える
 - アーティストが実際に設定を行う
- アーティストの扱うパラメタやUIをどうすべきか？
 - アーティストがどこまでのパラメタを制御すべきか？

アーティストがどこまで制御するべきか？

- アーティストがすべてを制御する
 - どの深度でどれだけのボケを発生させるかまですべて
 - アーティストが物理的整合性に制約されない
- プログラムによる光学シミュレーション
 - アーティスト設定のパラメタをもとにシミュレーション
 - アーティストは一般的なカメラパラメタを設定する
 - 絞り(F値)など
 - 物理的な整合性がある程度保たれる

- 比較的原始的な手法
 - 現在でも利用されている
- メリット
 - アーティストの思い通りのボケなどを設定できる
 - アーティストの自由度が非常に高い
 - 物理的には起こりえないボケの組み合わせなどが可能
 - 3つの距離のボケ量をそれぞれ任意に設定するなど
 - 物理的には2つが決まれば残りの一つは確定してしまう
 - オブジェクトの配置などを変えなくても制御できる

• デメリット

- 自然／魅力ある映像を実現できるかがアーティスト依存
 - アーティストにカメラの経験あるいは知識が必須
 - 魅力ある映像のためにはかなり専門的な知識が必要
 - カメラに慣れていないアーティストは不自然な設定をしてしまう
 - あるいは面白みのない映像になる
 - **カメラ経験がないと不自然さには気づきにくい**
 - よくある不自然な設定
 - » 近距離／中距離のボケ方に対して無限遠がボケ過ぎている
 - カメラに慣れているユーザは不自然さを感じる
- アーティストの負担が大きい
 - 簡単なパラメタだけでそれらしい制御ができない
 - すべてをアーティストが設定しなければならない

- 最近の比較的主流の方法
- 相互関係のある光学パラメタの整合性をどうするか？
- どこまで厳密に合わせるかは実装依存
 - F値と露出時間(シャッタースピード)と露出(EV)を厳密に扱う
 - 例
 - 絞りを大きくすることで露出が高くなる
 - 絞りを変えずに露出を下げるとシャッタースピードが速くなる
 - etc.
 - すべてに整合性がとられる
 - 個別のエフェクトの自由な制御が難しい
 - F値や露出やシャッタースピードは独立したパラメタとする
 - 例
 - 露出はトーンマップ等の明るさ制御専用
 - F値はボケの制御専用
 - シャッタースピードはモーションブラー制御専用
 - etc.
 - 扱いやすいが物理的には正しくない
 - カメラに慣れている人は不自然さを感じる
- アーティストの使いやすさを考慮すべき

- メリット
 - 物理的整合性がある程度水準で保たれる
 - 不自然なボケ量の組み合わせが発生しない
 - アーティストの設定するパラメタが比較的少ない

- デメリット

- アーティストが物理的整合性に制約される

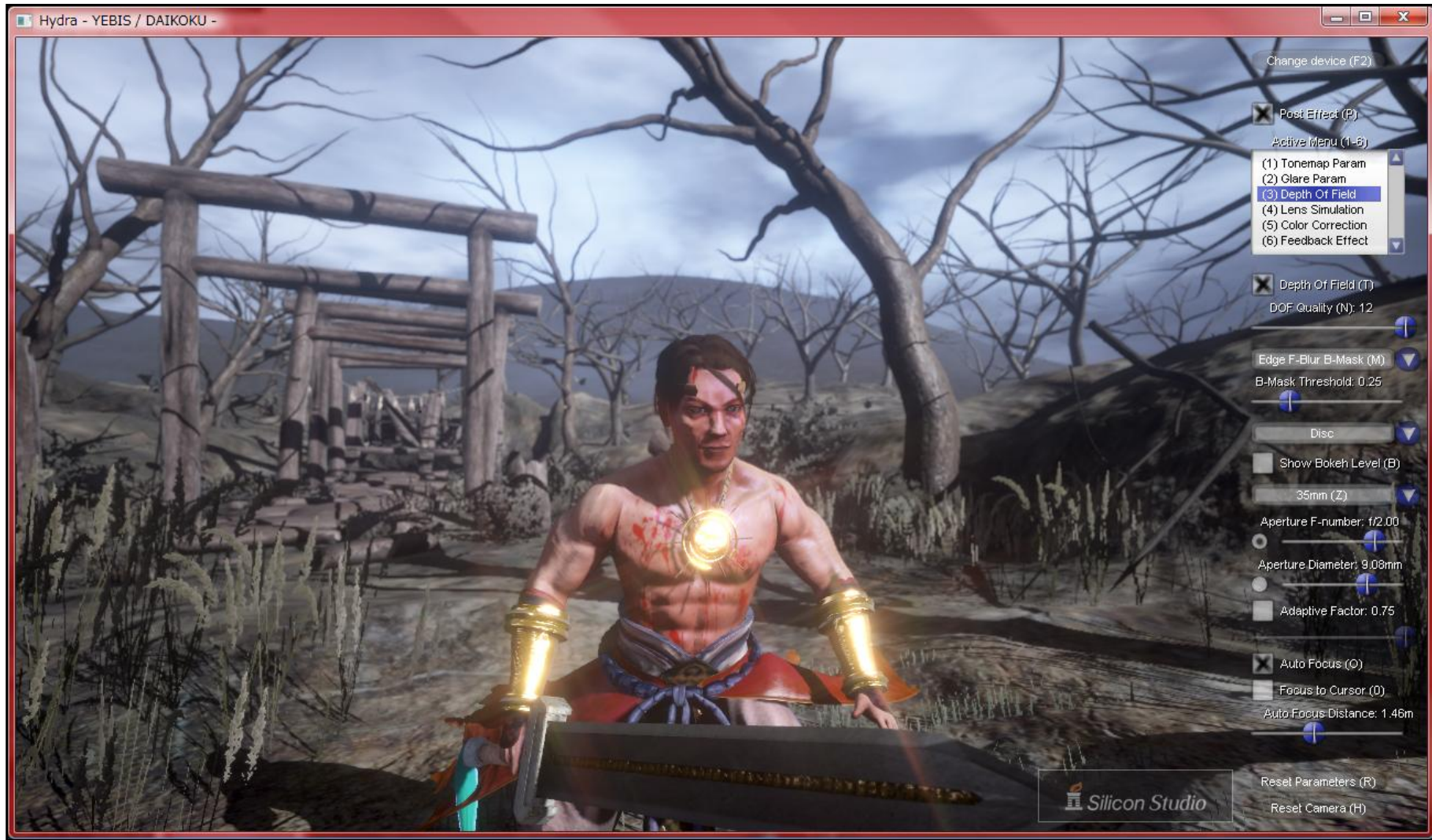
- 場合によっては思い通りのボケを設定することができない
- カメラやオブジェクトの位置を細かく調整する必要がある

- 設定できるパラメタの妥当性によっては不自然になり得る

- 光学シミュレーションをしているにも関わらず不自然になる
- 例えば
 - 画角に焦点距離で 10,000mm 相当などを指定
 - F値に f/0.1 などを指定
 - 望遠レンズのフォーカス距離に 1cm などを指定
 - etc.

- アーティストは必ずしもカメラに詳しい訳ではない
 - 設定できる値の妥当性を判断できるとは限らない
- よくあるパターン
 - ある人物にピントを合わせて奥(背景)をぼかしたい
 - カメラをゲームの一般的な画角(45度程度)で適当に配置
 - フォーカスを目的の人物に設定
 - 何故か奥がボケない...
 - 背景が望み通りにボケるまで絞りをどんどん開く(F値を小さくする)
 - F値が f/0.1 などになる
 - ミニチュアのような不自然な光景となる
 - この場合の問題はカメラの配置と画角であり絞り(F値)ではない
 - 現実的なパラメタではパンフォーカスとなるようなカメラ配置
 - 現実世界ではカメラを移動/ズームさせない限りボケない
 - 非現実な絞りが設定できてしまうことで不自然な結果になる
 - しかしカメラ経験をもたないアーティストではなかなか気づけない

35mmフィルムの現実的な設定 (f/2.0)



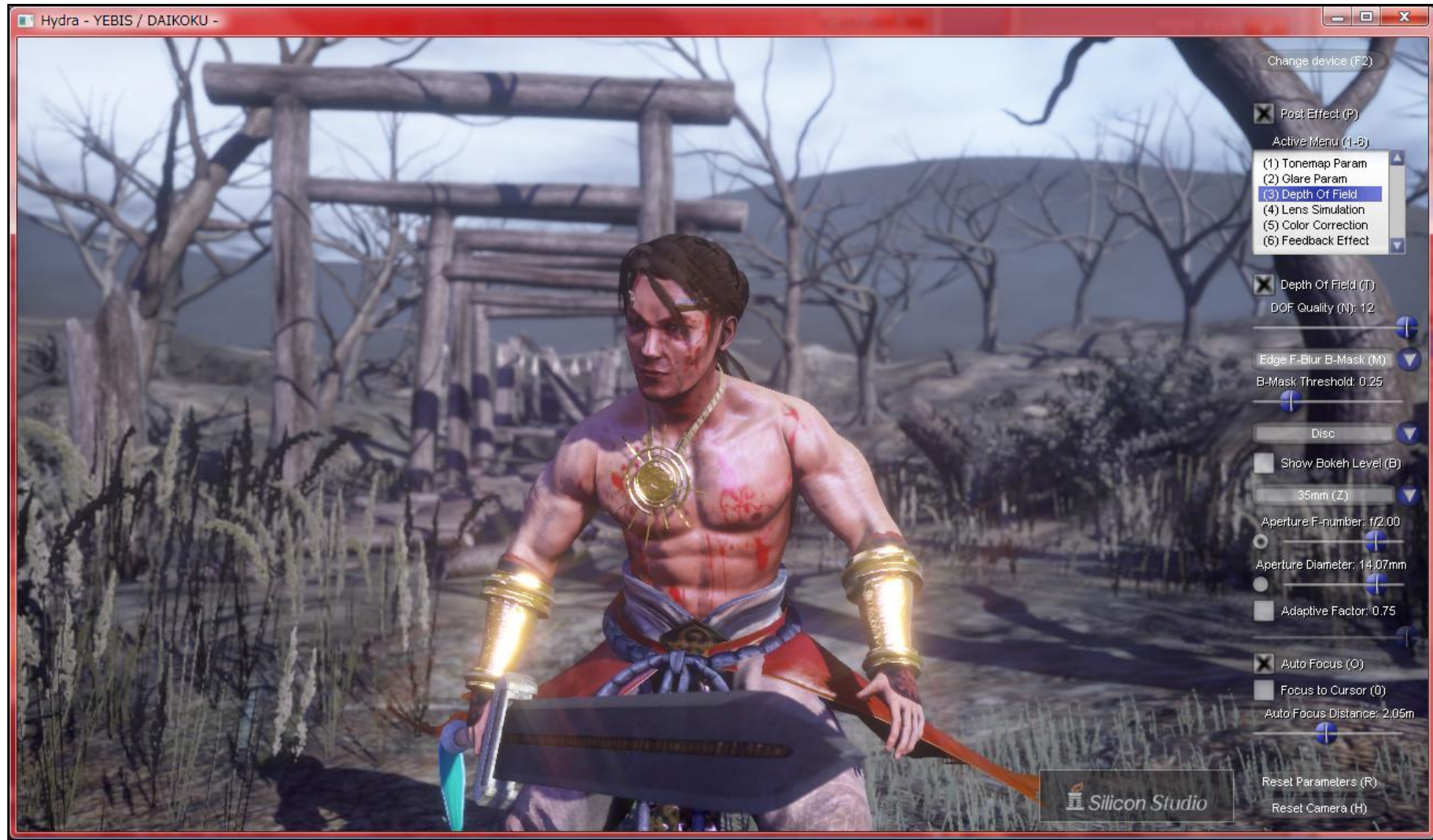
非現実的な設定 (f/0.135) による後ボケ表現



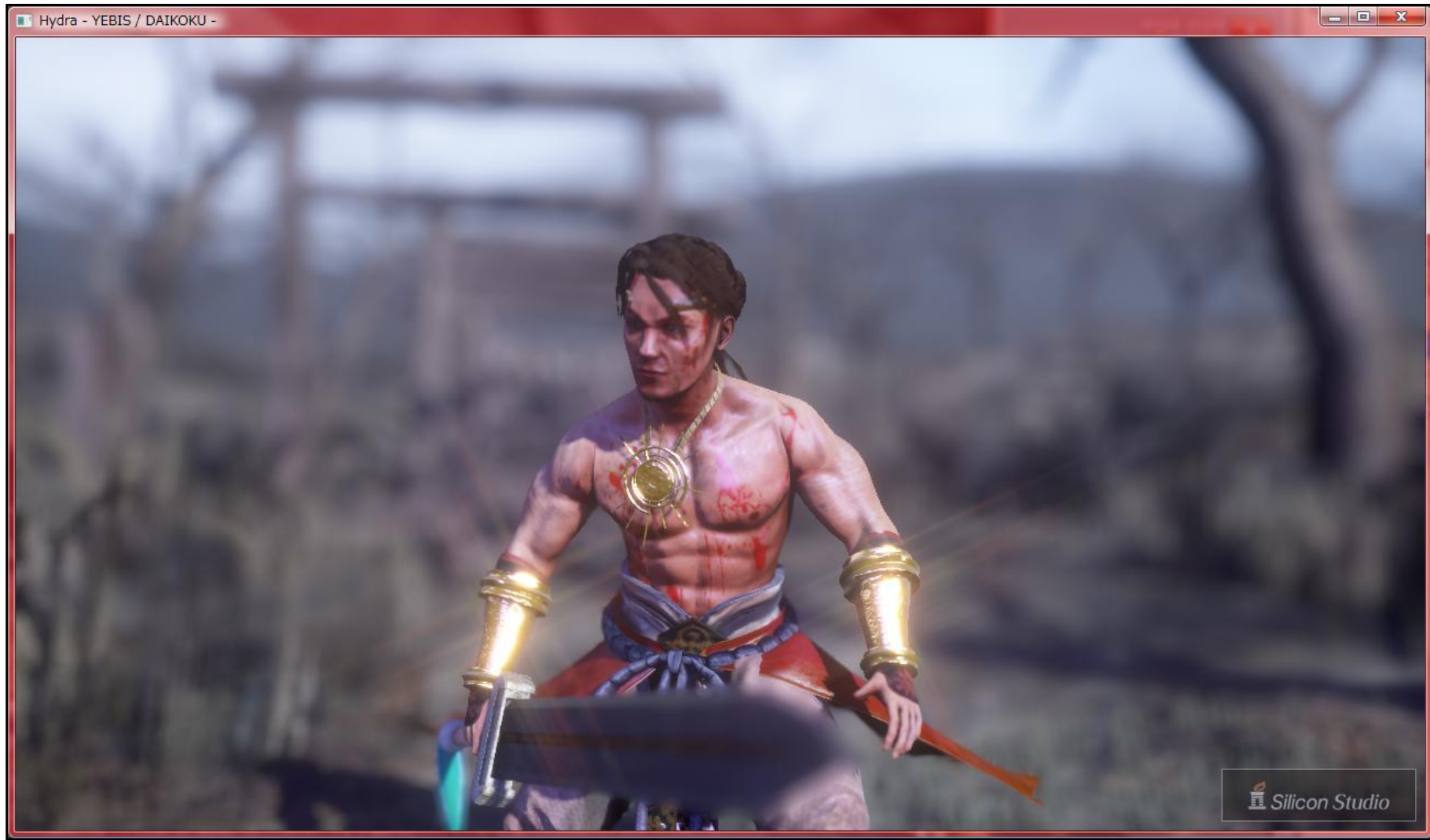
Silicon Studio



35mmフィルムの現実的な設定 (f/2.0)



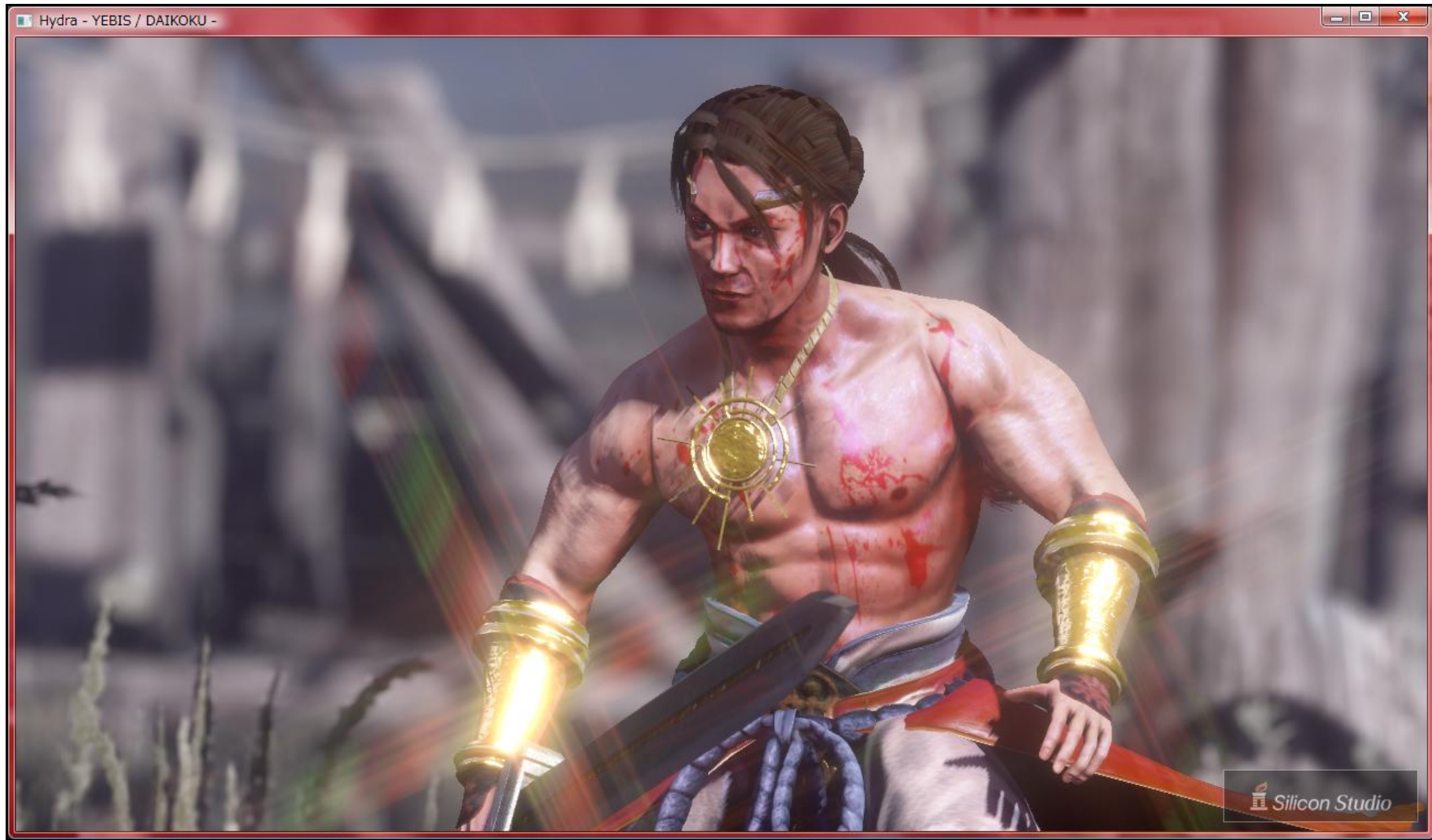
非現実的な設定 (f/0.27) による後ボケ表現



比較的現実的な設定 (f/2.0) による後ボケ表現



現実的な設定 (f/4.0) による後ボケ表現



- 光学パラメタを現実的な範囲への制限
 - F値は $f/2.0 \sim f/32$ 程度までに
 - コンパクトデジカメでは $f/8$ 程度までが普通
 - フォーカス範囲は等倍マクロ程度に制限
 - カメラの画角の範囲を制限
 - etc.
- パラメタを制限することでアーティストは別の工夫をする
 - カメラを動かさざるを得ない
 - あるいはカメラに詳しい人に相談する
 - 正しいぼかし方を身に付ける
 - 現実的で自然な設定を行えるようになる
- 制限すればするほどアーティストの自由度は下がる
 - ピンボケさせたいのにあまりボケてくれない
 - etc.
- 妥当性を判断できるアーティストの場合
 - あまり自由度を制限しないほうが得策かもしれない
 - 不自然さを感じさせることなく現実ではできない設定も可能
 - アーティストの能力に依存

- 光学パラメタの制御はどのようにすべきか
- 例えば
 - フォーカスの移動
 - フォーカスの移動にともなう画角の変化
- どのレベルで制御すべきか
 - プログラムで制御するか
 - アーティストが制御するか

- アーティストによる制御
 - やはりアーティストにカメラ／レンズの知識が必要
 - フォーカス移動のアニメーションは逆数に線形になること
 - フォーカスによる画角の変化はかなり専門的な知識
 - 結果の映像が大きくアーティスト依存となる
- プログラムによる制御
 - アーティストに目標となる距離だけを指定させる
 - 現在のフォーカスから目標値へのアニメーションを自動化
 - アーティストが設定するカメラの画角を基準
 - 実質的な画角の変化はプログラム側で自動的に行う
 - アーティストによっては制御したいと考えるかもしれない
 - フォーカシング機構のタイプなどはアーティストが設定可能に

- プログラム制御すべきパラメタの例
 - フォーカシングアニメーション
 - オートフォーカスや迷い動作も含む
 - フォーカシング時の画角の変化
 - ズーミング時の他のパラメタの連動
 - 絞りの変化
 - 望遠(長焦点)側では絞りの有効径に限界があることが多い
 - » 望遠側は広角側よりも開放絞りが高く(暗く)制限される
 - フォーカスが外れる
 - 一部のコンパクトデジカメではズーム中は至近距離にフォーカスがずれる
 - カメラ原点の調整
 - アーティストの設定したカメラの位置からNPPまで移動させる
 - 画角によってどの程度前方まで移動させるかを変化
 - 画角による周辺減光の変化
 - 制御パラメタのみアーティストからも指定可能に
 - コサイン4乗則の制御パラメタ
 - 鏡筒の長さやケラレの発生する位置
 - 露出調整
 - etc.

- プログラム制御すべきパラメタ
 - 現実のカメラで撮影者の意思とは無関係に起こる動作
 - レンズの機構上発生する動き
- アーティストの設定から変更する場合
 - アーティスト設定からずれ過ぎると問題になる
 - 大きく変更される値には注意
 - あるいは即時プレビューで確認できる環境が重要

エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

CEXEC

CESA Developers Conference

2010

まとめ

- エフェクトの実装には正しいパラメタを
 - 光学的に正しいパラメタで計算すること
- フォーカシング／ズーミングのアニメーション
 - 現実のカメラ特有の動きをそれらしく再現
- カメラ／レンズの種類を意識
 - 写真／スポーツ中継／映画
 - 適切なカメラ／レンズ／イメージセンサの選択
- 光学パラメタの適切な範囲への制限
 - 自由度が高いほど良いものができるという訳ではない

エンターテインメントの未来がここにある
Compile -Future Entertainment-

CEDEC

CESA Developers Conference

2010

Appendix

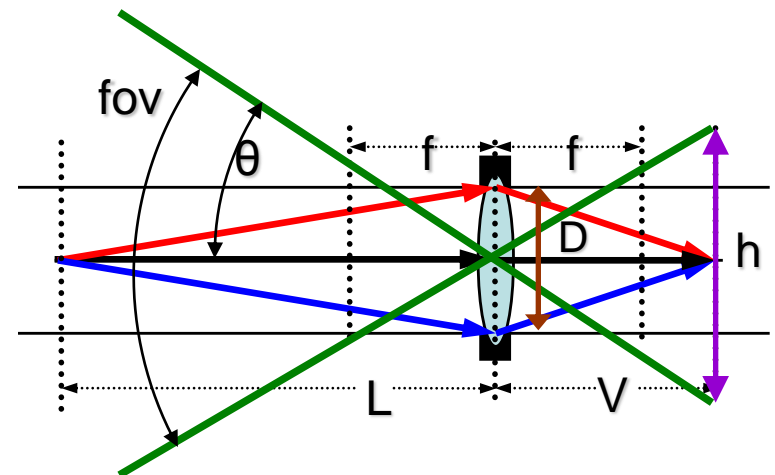
光学のさまざまな関係式

焦点距離／開口絞り／画角の関係

- f : Focal length (焦点距離: 平行光が焦点を結ぶレンズ後側主点からの垂直距離)
- L : Focus distance (レンズ後側主点からフォーカスまでの垂直距離)
 - L から出た光はレンズを通して V に集まる
- V : Image distance (像距離: レンズ後側主点からイメージセンサまでの垂直距離)
- D : 開口絞りの有効径 (入射瞳の直径)
- h : イメージセンサのサイズ
- fov : 視野角 (画角)
- θ : $fov / 2$ (半画角)
- t : $\tan(fov / 2) * 2 = \tan(\theta) * 2$ (半画角の正接の2倍)

- F : F-number (開口絞りのF値 / Fナンバー)
- Fe : Effective F-number (実効F値 / 実効Fナンバー)
- M : Magnification ratio (撮像倍率)

- $f = (Lh / 2) / (\tan(fov / 2)L + h/2) = (Lh / 2) / (\tan(\theta)L + h/2) = Fh / tFe = LM / (M + 1) = FD$
- $fov = \text{atan}(h / 2V) * 2 = \text{atan}(h/2 * (L - f) / Lf) * 2 = \text{atan}(h(L - f) / 2Lf) * 2$
- $\theta = fov / 2 = \text{atan}(h / 2V) = \text{atan}(h/2 * (L - f) / Lf) = \text{atan}(h(L - f) / 2Lf)$
- $M = f / (L - f) = V / L$
- $F = f / D = h / tD = Fe(L - f) / L$
- $Fe = V/D = (M + 1)F = FL / (L - f) = Lf / (L - f)D = FV / f$
 - $Fe : F = L : L - f = M + 1 : 1$
- $h = tV = tFeD$
- $D = h / tFe$
- $L = Vf / (V - f) = V/M = f/M + f = (M + 1)f / M$
- $V = Lf / (L - f)$
 - $= LM = fM + f = (M + 1)f = FeD$
 - $= h / (\tan(fov / 2) * 2) = h / (\tan(\theta) * 2) = h/t$



- δ : Permissible Circle of Confusion (許容錯乱円)
 - イメージセンサ上でこれ以下なら実質的に一点に集光(合焦)しているとみなせるボケの直径
- ε : Depth of Focus (像側の焦点深度)
 - イメージセンサから $\pm\varepsilon$ (前後にそれぞれ ε)の範囲では実質的に合焦しているとみなせる距離
- L_f : 近点(前方合焦距離)
 - ピントが合っているとみなせる最小距離
- L_r : 遠点(後方合焦距離)
 - ピントが合っているとみなせる最大距離
- DoF_f : Front Depth of Field (前方被写界深度)
 - フォーカス距離から近点(ピントの合う最小距離)までの距離
- DoF_r : Rear Depth of Field (後方被写界深度)
 - フォーカス距離から遠点(ピントの合う最大距離)までの距離
- H : Hyperfocal Distance (過焦点距離)
 - 無限遠フォーカス時の近点(前方合焦距離)
 - 無限遠フォーカス時にこの距離まではピントが合っているとみなせる最小距離
 - 前ボケが許容錯乱円径以下となる最小距離
 - 遠点(後方合焦距離)が無限遠となる最小のフォーカス距離
 - この距離にフォーカスすれば無限遠までピントが合っているとみなせる最小距離
 - 無限遠の後ボケが許容錯乱円径以下となるような最小フォーカス距離

- $\varepsilon = \pm Fe\delta = \pm \delta V / D = \pm \delta f(M + 1) / D = \pm \delta LM / D$
- $H = f(D + \delta) / \delta = (f^2 + fF\delta) / F\delta = f^2 / F\delta + f$
- $L_f = HL / (H + L) = L - DoF_f$
- $L_r = HL / (H - L) = L + DoF_r$
- $DoF_f = L - L_f = \delta FL(L - f) / (f^2 + \delta F(L - f))$
- $DoF_r = L_r - L = \delta FL(L - f) / (f^2 - \delta F(L - f))$

- $CoC(\infty)$: 無限遠での錯乱円径
- $CoC(\infty) = VD / L = V^2 / LFe$
 - $= FeD^2 / L = h^2 / LFet^2$
 - $= fD / (L - f) = f^2 / (L - f)F$
 - $= FD^2 / (L - f) = MD$
- $CoC_{SR}(\infty)$: 無限遠での錯乱円径のスクリーンサイズに占める割合
- $CoC_{SR}(\infty) = CoC(\infty) / h$
 - $= VD / Lh = V^2 / LFeh$
 - $= FeD^2 / Lh = h / LFet^2$
 - $= fD / (L - f)h = f^2 / (L - f)Fh$
 - $= FD^2 / (L - f)h = MD / h$
- $CoC(z)$: 特定の z (距離)における錯乱円径
- $CoC(z) = CoC(\infty) * (z - L) / z$
 - $= VD / L * (z - L) / z$
 - $= fD / (L - f) * (z - L) / z = MD * (z - L) / z$
 - $= (Lf / (L - f) - zf / (z - f)) * (z - f)D / zf$
 - $= (zV - zf - fV)D / zf$
 - $= (zV - zf - fV) / zF = (V - f) / f - VD / z$
 - $= (Lf / (L - f) - zf / (z - f)) * (z - f)D / zf$
 - $= (Lf / (L - f) - zf / (z - f)) * (z - f) / zF$
- $CoC_{SR}(z)$: 特定の z (距離)における錯乱円径のスクリーンサイズに占める割合
- $CoC_{SR}(z) = CoC(z) / h$
 - $= CoC(\infty) * (z - L) / zh = CoC2SR(\infty) * (z - L) / z$
 - $= VD / L * (z - L) / zh$
 - $= fD / (L - f) * (z - L) / zh = MD * (z - L) / zh$
 - $= (zV - zf - fV)D / zfh$
 - $= (zV - zf - fV) / zFh = (V - f) / fh - VD / zh$
 - $= (Lf / (L - f) - zf / (z - f)) * (z - f)D / zfh$
 - $= (Lf / (L - f) - zf / (z - f)) * (z - f) / zFh$

- φ : Half Angular Aperture (半集光角)
 - NA : Numerical Aperture (開口数 N.A.)
 - d : エアリーディスク径
 - n : 像側屈折率 (通常は空気の屈折率 = 1.0)
 - λ : 計算対象とする光 (電磁波) の波長
 - σ : エアリーディスクを正規分布で近似する場合の標準偏差
-
- $\varphi = \text{asin}(1 / 2F\#) = \text{asin}(D / 2V)$
 - 正弦条件を満たす理想的なレンズの場合
 - $NA = n * \sin(\varphi) = n / 2F\# = nD / 2V$
 - $F\# = V / D$
 - 正弦条件を満たす理想的なレンズの場合
 - $d = 2 * 0.6098\lambda / NA = 2 * 1.2196\lambda F\# / n$
 - $\sigma = 0.42\lambda F\# = d * 0.17219$

