

# Imagine Day

最新世代機に関わる技術トラック

ムケテ、未来。

CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

# レンダリスト養成講座 2.0

川瀬 正樹

シリコンスタジオ株式会社

R & D 統括本部

ソフトウェアエンジニアリング部

# 魅力ある絵作りをめざして

- 色空間とダイナミックレンジ
  - シーンのダイナミックレンジの重要性
  - sRGB色空間とガンマ
  - 線形空間ライティングとガンマ補正
  - ポストエフェクトにおけるダイナミックレンジ
  - 色空間とダイナミックレンジのまとめ
- 光学に基づいたボケ味の表現
  - ボケ味
  - レンズと収差のおさらい
    - 結像の仕組み
    - レンズの収差
  - ボケカーネルの生成
  - 被写界深度エフェクトの実装
  - サンプル画像集
  - ボケ味表現のまとめ

ムケテ、未来。

CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008  
FOR NEXT 10 YEARS

# 色空間とダイナミックレンジ

魅力的なHDRシーンデザインのために

# シーンのダイナミックレンジの重要性

- ダイナミックレンジ
  - ここではシーンを構成する明暗の比を指すことにします
- HDRの基本
  - HDRを活かした絵作りには必須の概念
- 明るい部分と暗い部分の明るさの違い
  - 日向と陰
  - 屋外と屋内
  - 拡散反射と鏡面反射
  - 昼と夜
  - etc.

# 現実世界のおおよその明るさ

	単位:ルクス(lux)
• 真夏の晴天	100,000
• 冬の晴天	50,000
• 曇り	15,000 ~ 50,000
• 木陰の木漏れ日	10,000 ~ 30,000
• 日陰	1,000 ~ 10,000
• 室内照明	100 ~ 1,000
• 街灯の下	10 ~ 15
• 映画館上映中の客席	3 ~ 5
• 1メートル離れたろうそくの灯り	1
• 満月	0.2
• 新月の星空	0.0003

# 明るさの違いに注目

- 細かい値は重要ではないが...
  - これだけの差があるという事実には留意しておこう
- シーンをデザインする際の参考となる
  - 太陽の直接光と環境光の差
    - 日向と日陰では日向の方が10倍～100倍ほど明るい
  - どちらが明るいかを意識しておくが良い
    - 日陰と室内では日陰の方が10倍ほど明るい
    - 曇りでも室内よりは十数倍～数十倍ほど明るい

ムケテ、未来。

CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008  
FOR NEXT  
10  
YEARS

# *sRGB* 色空間とガンマ



# 色空間

- 色空間とは
  - 色を表現するための空間
- ダイナミックレンジを考慮すると必要になる概念

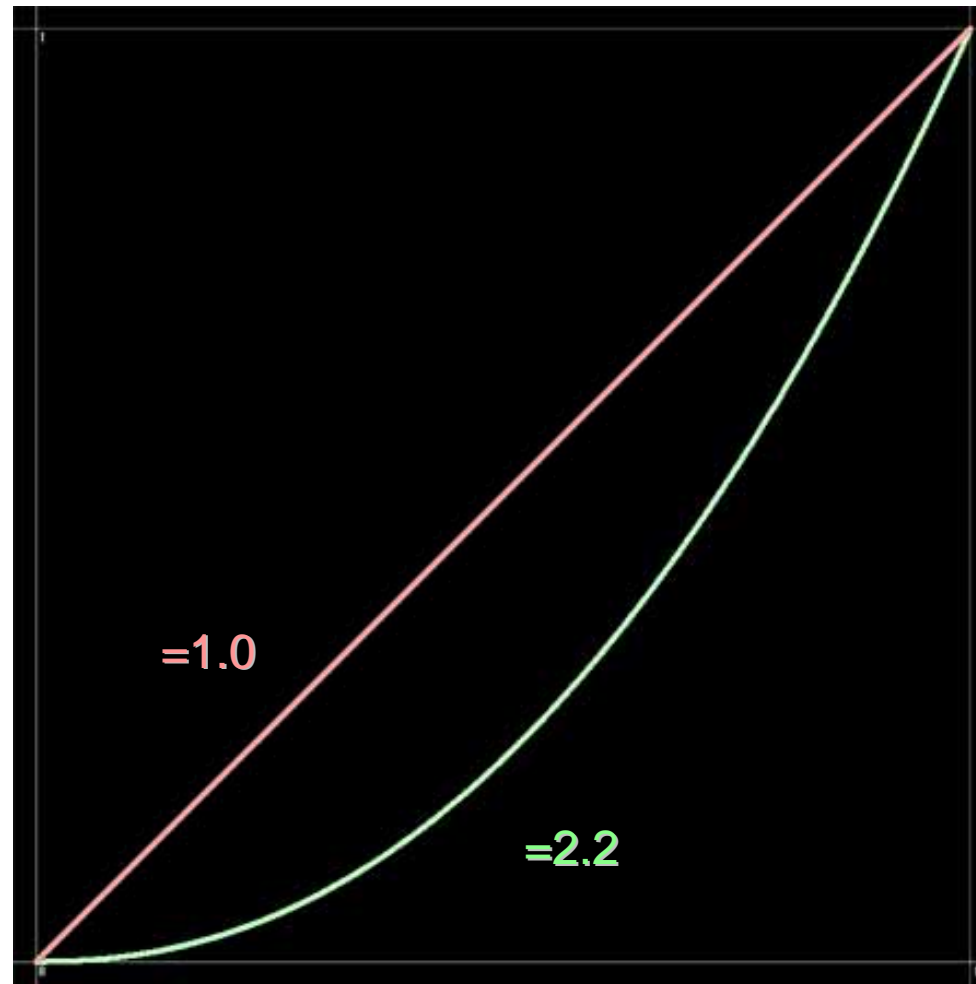
# 線形および非線形な色空間

- 線形色空間(リニアスペース)
  - 明るさ(ルクス)などはエネルギーに基づく値
  - ライティングは本来エネルギーに線形なモデル
- 非線形色空間
  - CRTディスプレイ
  - 印刷物
  - etc.
  - 出力デバイス

# sRGB色空間

- standard RGB
- IEC (国際電気標準会議) 策定
- 色空間の国際標準規格
- 非線形な色空間
  - 一般的なテレビ / モニタなど
    - ガンマ( )2.2

## 2.2のカーブ



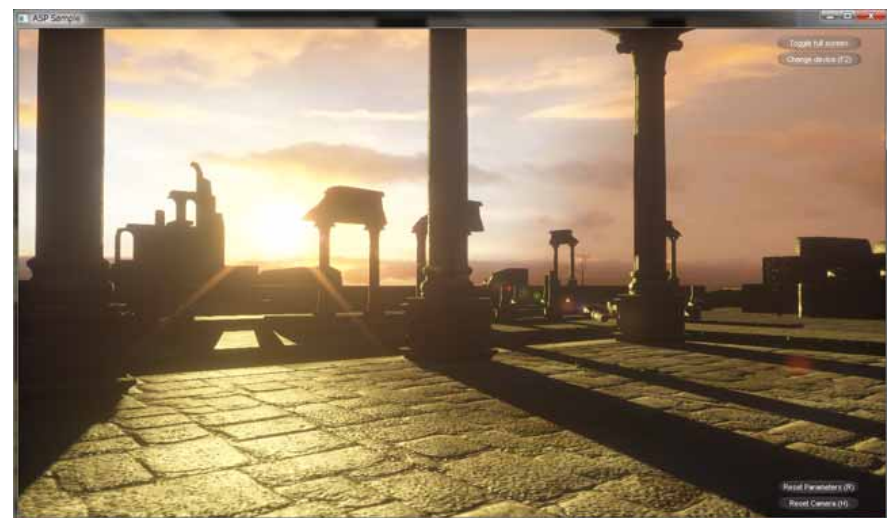
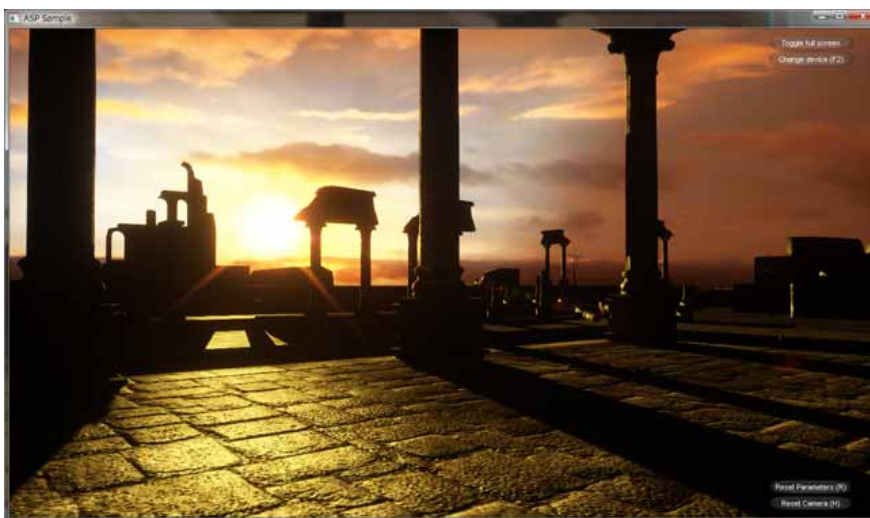
# ガンマ補正

- モニタのガンマ特性に合わせた非線形逆変換

$$O = i^{1/\gamma}$$

- 正確なHDRレンダリングのためには必須
  - ライティングは線形空間で行わなければならない
  - モニタ出力は非線形空間で行わなければならない
- 従来のシーンデザインでは
  - デザインもライティングもモニタ出力もすべてsRGB空間
  - 物理的に正確ではなく不自然なライティング

# ガンマ補正の有無の比較



# ガンマ補正の有無の比較



# ガンマ補正の有無の比較

- 現実に近いダイナミックレンジをもつシーン
  - 言わばガンマ補正を前提としている
- ガンマ補正が無いと
  - コントラストが高くなる
  - 彩度が高くなる
  - 不自然さが目立つ
- レンダリングとモニタ上の色空間が異なるため



# しかしガンマ補正にはいろいろな問題が...

- ガンマ補正するとバンディングが出やすい
- アーティストに色空間を意識してもらうのは...
  - アーティストはもともとsRGB空間でデザインしている
  - リニア空間でテクスチャを作ると精度が落ちやすい
    - 非常に暗い部分の精度が著しく低下する
- かといってハードウェア色空間変換にも問題がある
  - サポートしていない環境がある
  - 変換精度が低いことがある
  - テクスチャフィルタがsRGB空間のままかかる
    - 従来からなのでそれほど大きな問題ではない
- そもそもガンマ補正なんて本当に必要なの？

ムケテ、未来。

CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

# 線形空間ライティングと ガンマ補正

本当に必要なのかと小一時間 (ry

# ガンマ補正なんてしなくても...

- そもそもアートワークの調整は見た目で行う
- 補正なしの状態デザインすれば良いだけでは？
  - HDR素材などは直接使わない
  - 補正なしで調整すればほぼ同じ魅力を出せるはず
- つまり従来の方法でも問題ないのでは？
  - ライティングが多少不自然でも気付かないのでは？

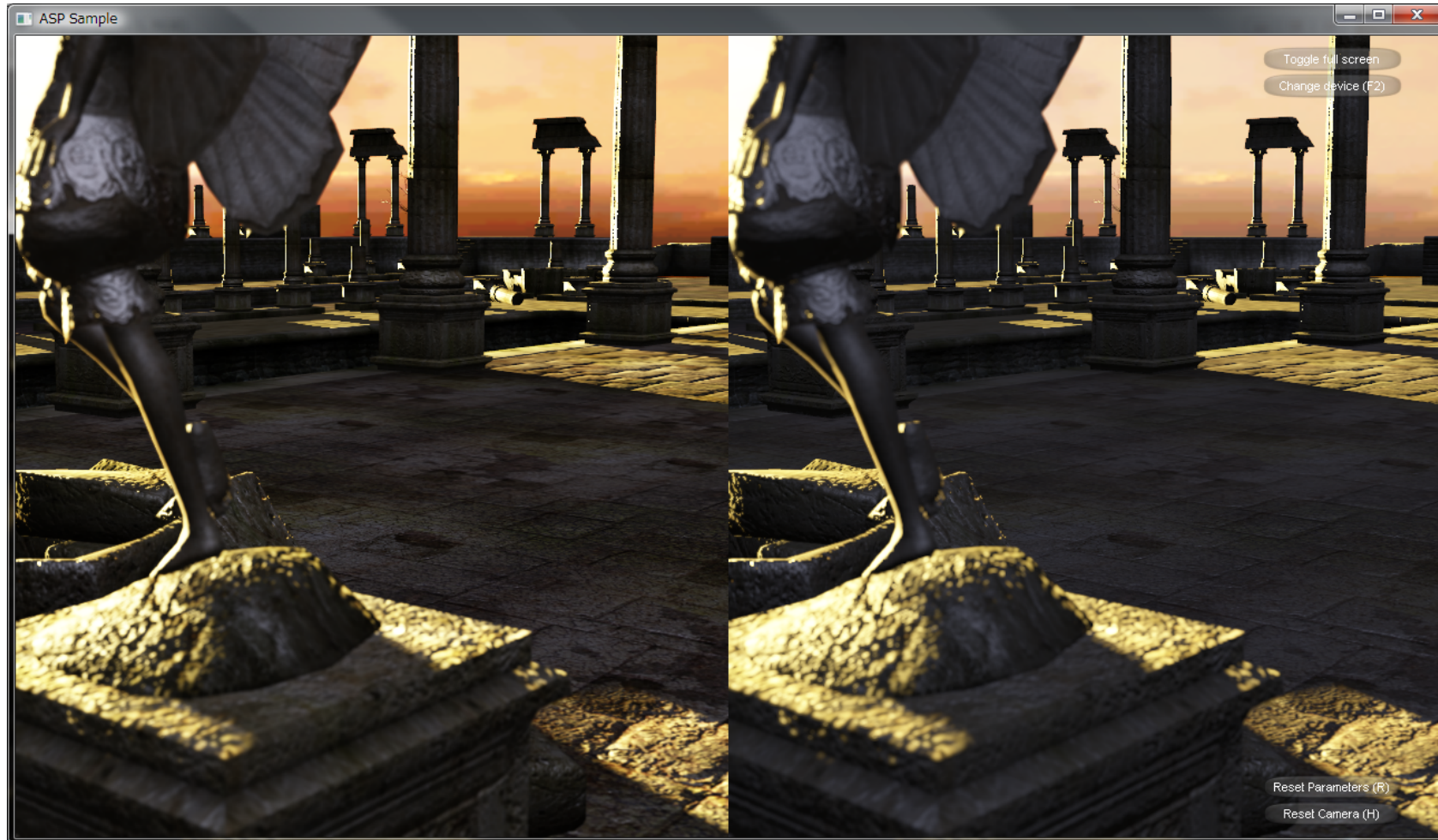
# sRGBシーンとHDRシーンの比較

- 従来通りにすべてをsRGBでデザインしたシーン
  - HDRではあるが、ダイナミックレンジは現実よりも低い
  - sRGB空間ライティング
  - ガンマ補正なし
  - 物理的に正確ではなく、不自然な(はずの)表現
- HDRを活かしてデザインしたシーン
  - ダイナミックレンジは現実に近い
  - 線形空間ライティング
  - ガンマ補正あり
  - 物理的により正確で自然な(はずの)表現

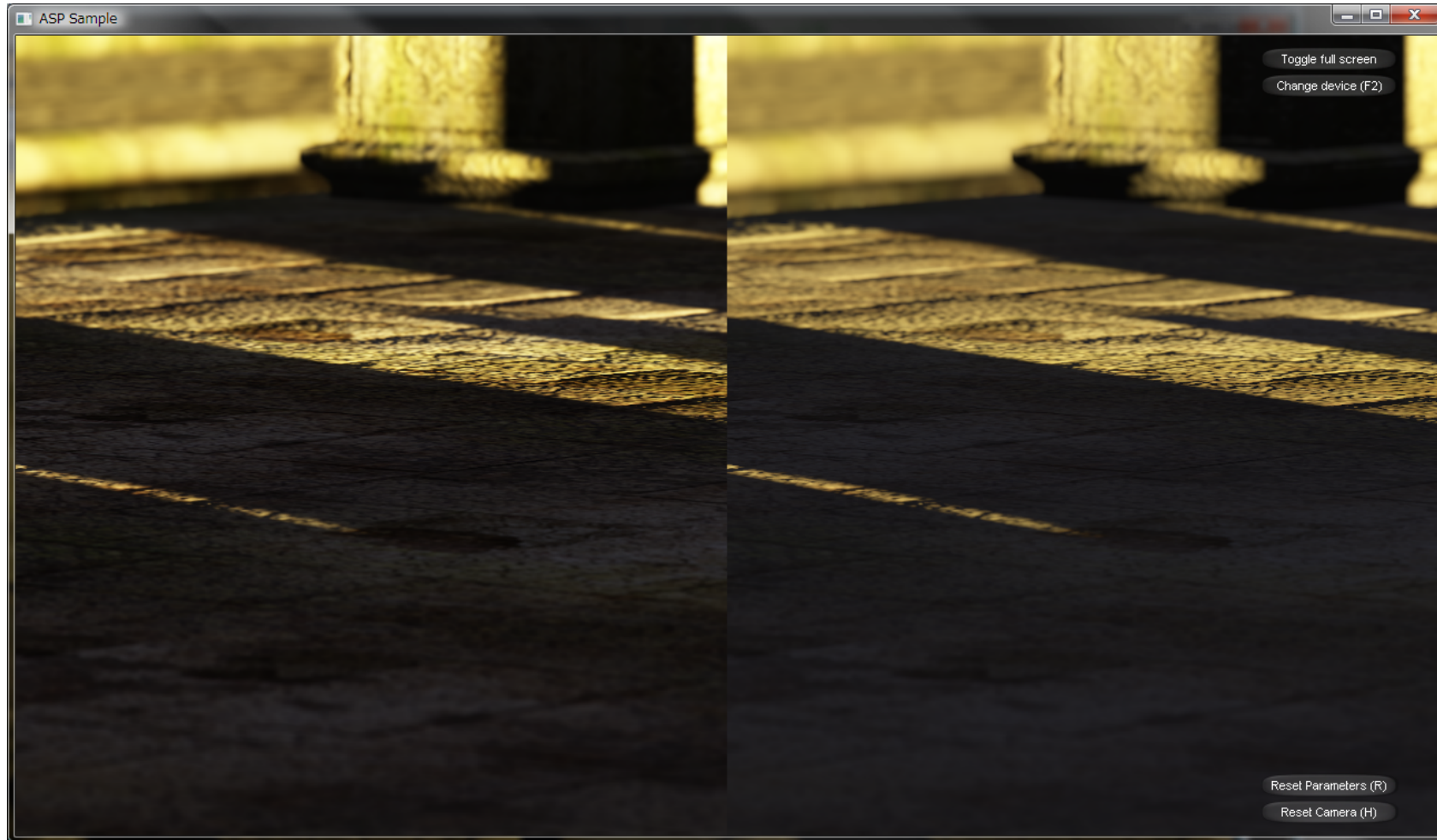
# どちらがより自然でしょう？



# どちらがより自然でしょう？



# どちらがより自然でしょう？



# 自然さに差はあるか

- 少なくとも上の比較では有為な差は認められない
  - よく見ると違いはある
    - ライティングは実際に不自然になっているはず
  - しかし普通の人にはまったく気にならない程度
    - シーンによってはもう少し差が出ることもある
- やはり必要ないのでは？



ムケテ、未来。

CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008  
FOR NEXT 10 YEARS

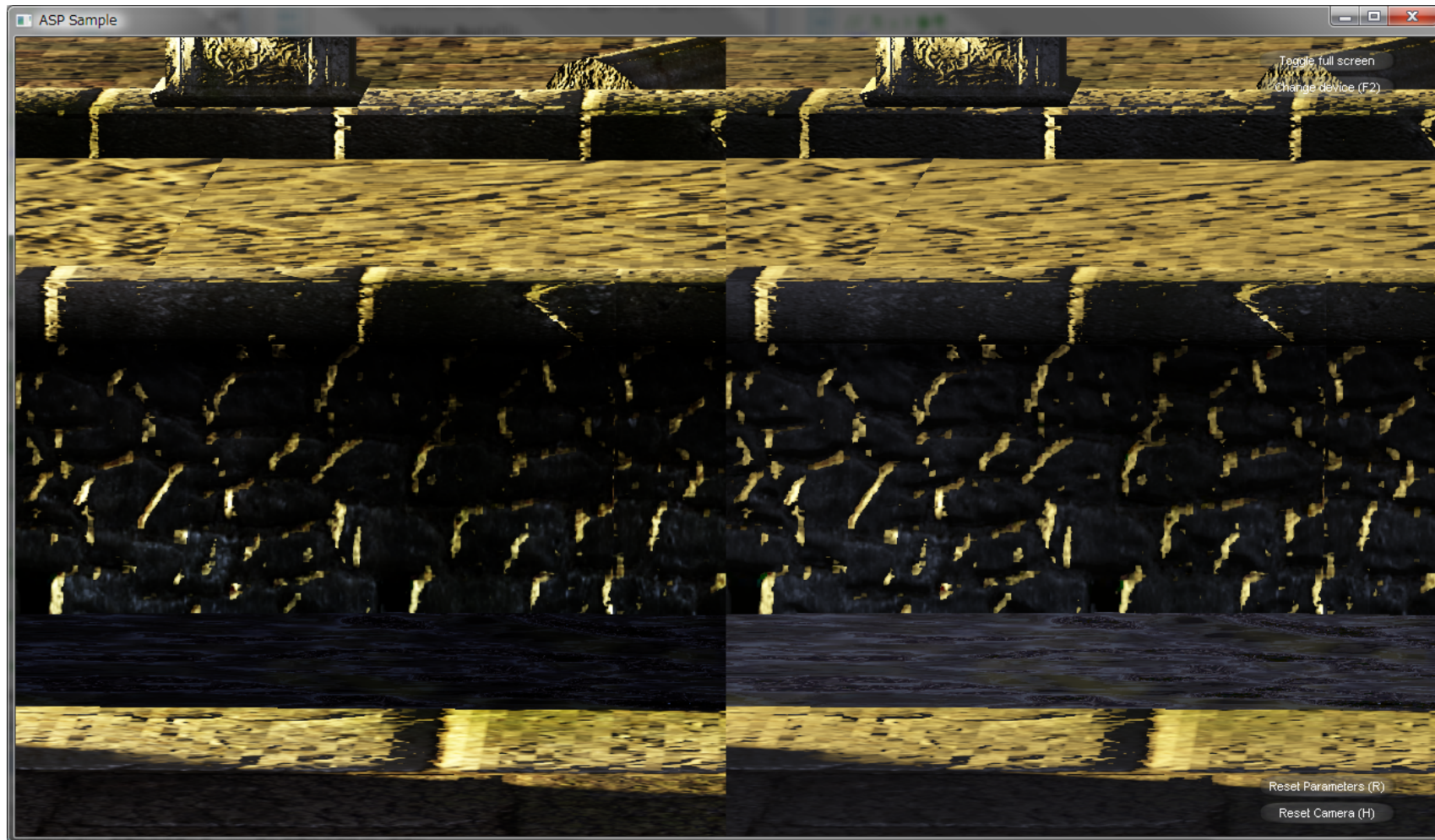
# ポストエフェクトにおける ダイナミックレンジ

ライティングの正確さで差が出るケース

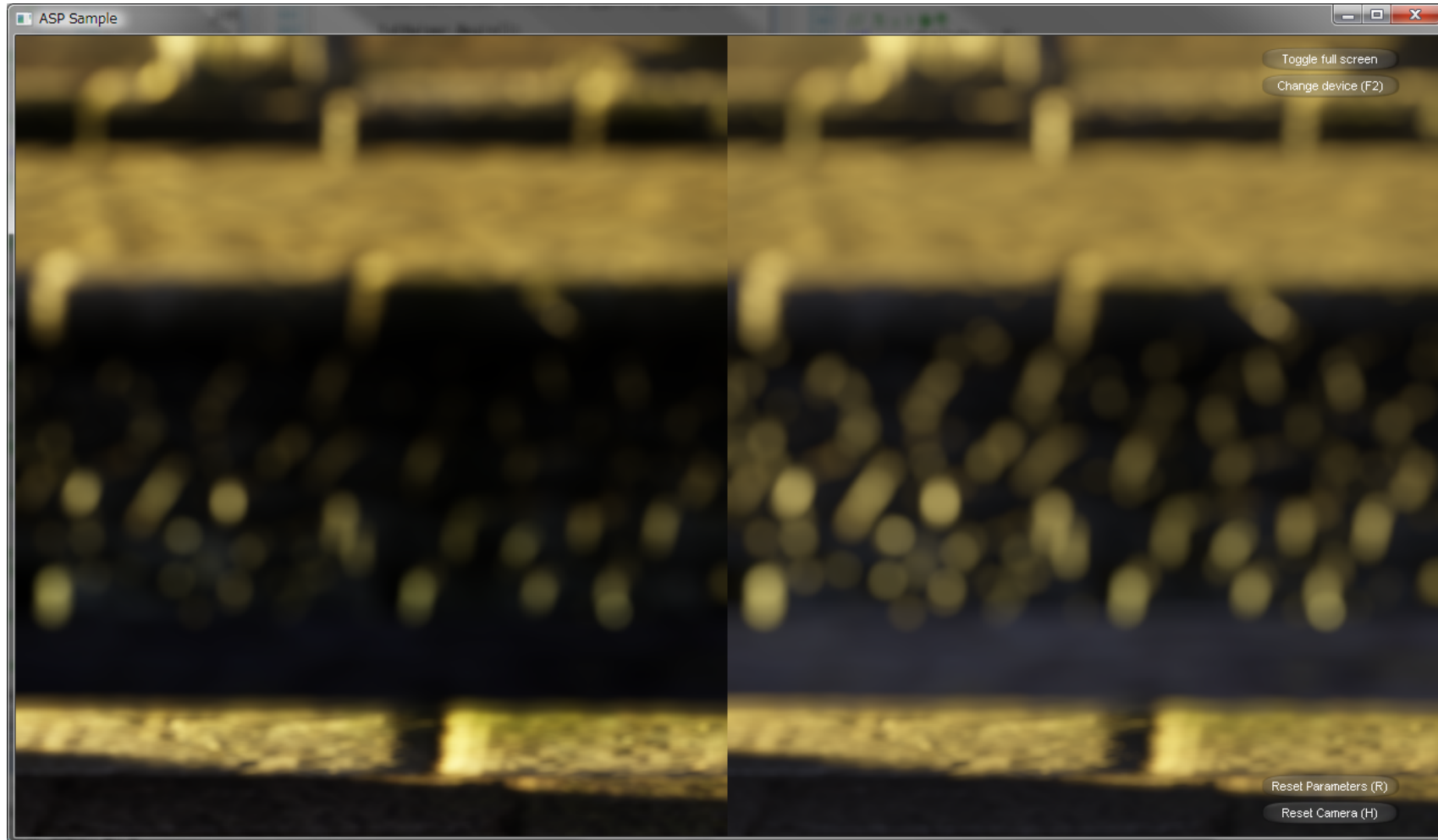
# ブラーエフェクト

- さまざまなブラーエフェクト
  - 被写界深度
  - モーションブラー
  - グレア

# エフェクトなし

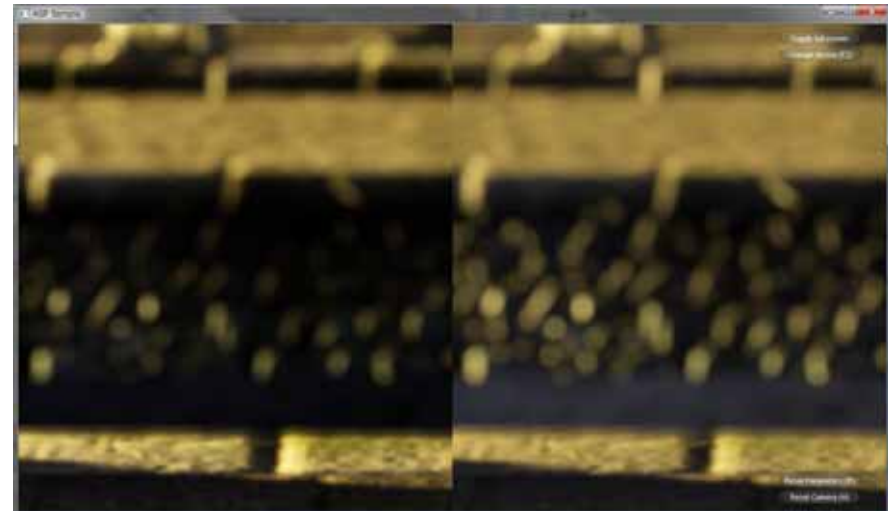
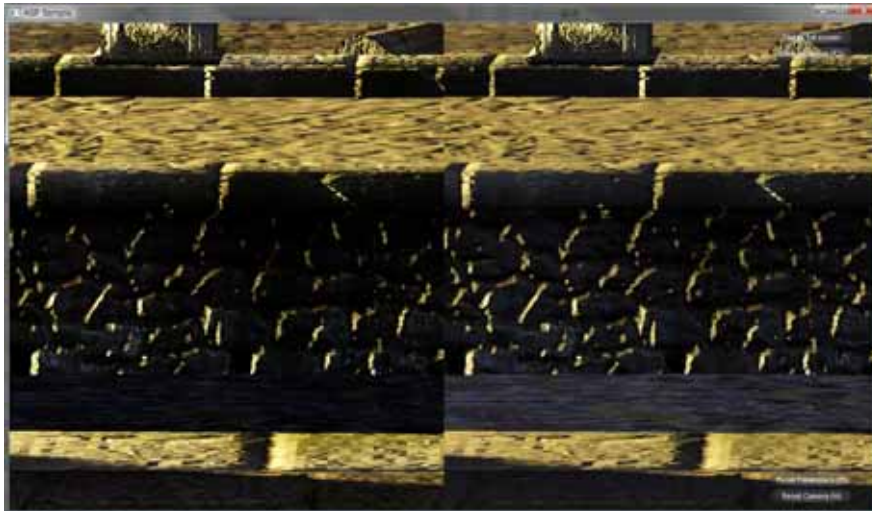


# 被写界深度エフェクトあり



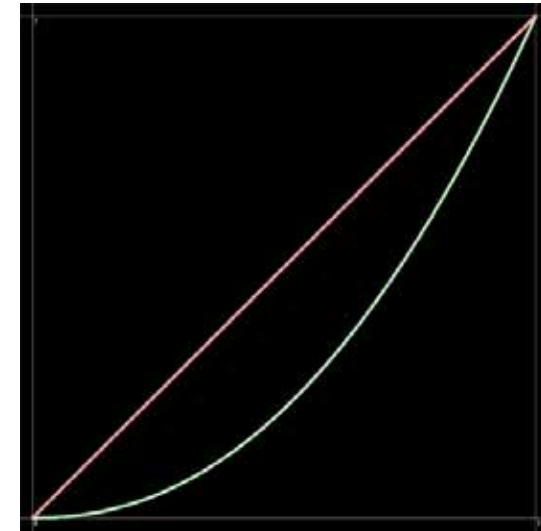
# 被写界深度適用時の差

- 被写界深度処理を適用していないとき
  - 有意な差は見られない
- 被写界深度処理を適用したとき
  - ボケの形がより鮮明に現れる
    - ボケの大きさとシーンにもよる
- 現実の写真でも
  - 拡散反射でも陰部分との輝度差は大きい
  - ボケ形状は拡散面にも現れる



# モニタのガンマ特性

- ガンマ2.2のsRGB空間では暗い部分が著しく暗くなる
  - 0.2 の出力はモニタ上では約 0.029
  - およそ1/7の明るさになる
- sRGB空間で無意識にシーンをデザインすると
  - 現実世界よりもダイナミックレンジを低くしてしまいがち
  - 場合によっては10倍以上の差が発生してしまう
- ボケの明るさは面積に反比例して暗くなる
  - 二次元のブラーのため大きさの2乗に反比例
  - 元のダイナミックレンジが低いとすぐ見えなくなる
- 被写界深度エフェクト適用時の魅力が低下する



# その他のエフェクトへの影響

- グレア
  - シーンダイナミックレンジが適切であれば
    - 日陰や拡散反射面が不自然に輝かない
    - 鋭いスペキュラーに強いグレアが発生する
  - 本来の輝度差に応じた適切な表現が可能

# シーンのコントラストを調整するとき

- シーンのダイナミックレンジに注意
  - メインライトと環境光
  - 鏡面反射と拡散反射
  - これらの比率は適切か
    - 現実世界と比べてあまり狭くなっていないか
- コントラストが不自然と感じたら
  - まずダイナミックレンジが適切かを確認する
  - 先にガンマカーブによる調整を行わない



ムケテ、未来。

CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

# 拡散反射テクスチャの色空間

テクスチャリソースを  
どの空間で用意するか

# 拡散反射テクスチャの色空間

- 線形空間ライティングで扱う拡散反射テクスチャ
  - 情報としては反射率分布であるためLDRでよい
- テクスチャリソースをどの空間で用意するか
  - 線形空間で用意する
  - sRGB非線形空間で用意する

# 線形空間で用意する

- 線形空間で用意する
  - アーティストが使いにくい
    - ガンマ調整で線形空間に変換して出力
    - 最終出力よりもコントラストと彩度が高い状態
    - ただしこれはコンバータで自動化可能
  - レンダリングエンジン側ではとくに変換の必要がない
  - 最後にガンマ補正が入るため精度が損なわれやすい
    - 線形空間はsRGB空間よりも暗い部分の分解能が低い
    - ガンマ補正によって暗い色に顕著なバンディングが発生する

# sRGB空間で用意する

- sRGB空間で用意する
  - アーティストが使いやすい
    - 従来どおりの作業でよい
  - テクスチャフェッチ時に変換が必要
    - sRGBから線形空間へ
    - 可能であればハードウェアの変換を利用する
    - シェーダで変換すると比較的ペナルティが大きい
      - もしくは  $\approx 2.0$  つまり高速な2乗計算だけで妥協
  - 精度はテクスチャリソース作成時のレベルを維持できる

# 拡散反射テクスチャの色空間

- それぞれメリットとデメリットがある
- 理想的にはsRGB空間でもつ方が良い
  - アーティストの使い勝手とクォリティ面から
- HDR素材の場合は線形空間で
  - 反射率ではなくエネルギーを保持する場合

ムケテ、未来。

CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

# 色空間とダイナミックレンジの まとめ

# 色空間とダイナミックレンジのまとめ

- HDRを活かした線形空間ライティングとガンマ補正
  - エフェクトを適用しない場合はそれほど重要ではない
    - HDR素材は使わないことが前提
    - 従来のライティングとの有意な差は現れにくい
      - シーンによってはやや不自然さが目立つ場合もある
      - 物理的に不自然であることは認識しておこう
  - エフェクト適用時は重要になることがある
    - エフェクトによっては大きな差が現れる
      - 特に被写界深度エフェクト
    - 現実世界での明るさの違いを意識しよう
  - エフェクトのみダイナミックレンジを拡張
    - 擬似的に明暗比を強調してもよい

# 色空間とダイナミックレンジのまとめ

- 絵作りのためのコントラストの調整
  - まずシーンのダイナミックレンジに注目
    - 現実世界と比べて狭すぎないか
  - 安易にガンマ値による調整に手を出さない
- 拡散反射テクスチャの色空間
  - できればsRGB空間で用意する
    - テクスチャフェッチ時にsRGBから線形空間へ変換
    - アーティストが使いやすい
    - 精度が損なわれない



ムケテ、未来。

CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

# 光学に基づいたボケ味の表現

リアリティのあるデフォーカスを  
表現するために

# ボケ味 (Bokeh)

- 主にレンズの収差に起因するボケの風味
  - 収差および補正しきれない残存収差による個性
    - 収差と補正については後述
- レンズとしては本来歓迎されないアーティファクト
  - 逆に写真らしさを感じさせる要因の一つ

# さまざまなボケ味



# 被写界深度エフェクトのアルゴリズム

- 現在はギャザーベースが主流
  - 出力先ピクセルを確定
  - 出力先に集まるべきピクセルをサンプリング
- 一部で使われているスキッターベース手法
  - ソースとなるピクセルを確定
  - そのピクセルの影響先を描画する

# スキャッターベース手法

- 元画像を走査
  - ソースとなるピクセルを確定
- ソースのピクセルをフィルタカーネルで描画
  - ジオメトリ(スプライト)を動的に生成
- ジオメトリシェーダで自然に実装できる
  - CPUオーバーヘッドがなく非常に効率的
- フィルタカーネルを自由に定義できる
  - カーネルはテクスチャ画像をそのまま利用できる
  - 任意のボケ形状を表現可能

# 光学に基づいたボケ味の表現

- スキャッターベース手法を活かして
  - フィルタカーネルを光学に基づいて生成
    - レイトレースでテクスチャ生成
- リアリティのあるボケ味の再現を目指す

ムケテ、未来。

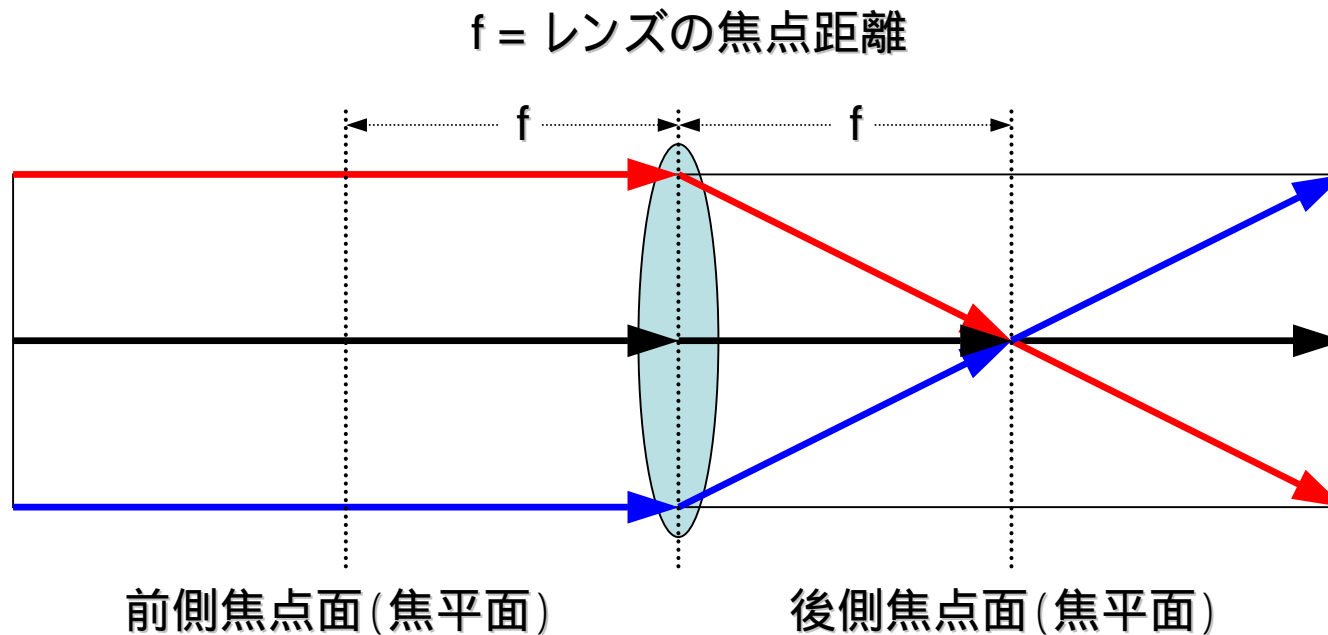
CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

# レンズと収差のおさらい

CEDEC 2007 より

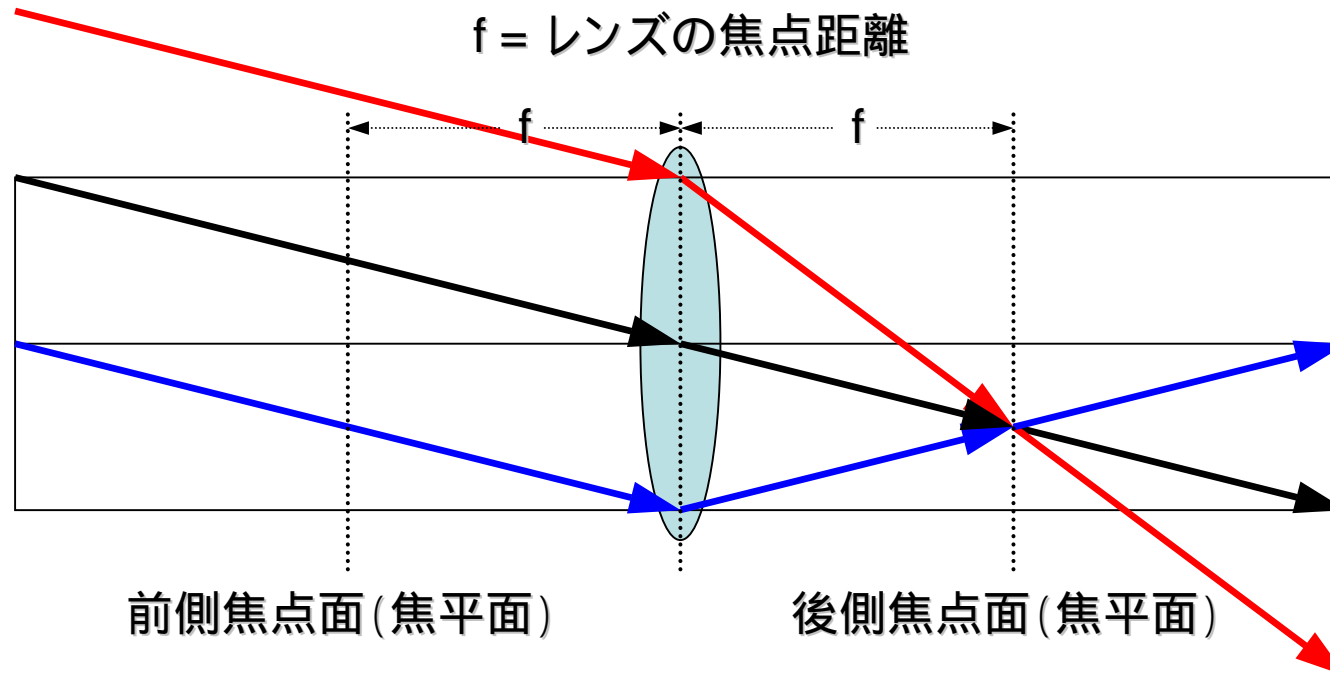
# レンズの基本



- 焦点距離 ( $f$ )
  - 平行光線 (無限遠からの光) が焦点を結ぶレンズからの垂直距離
- 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

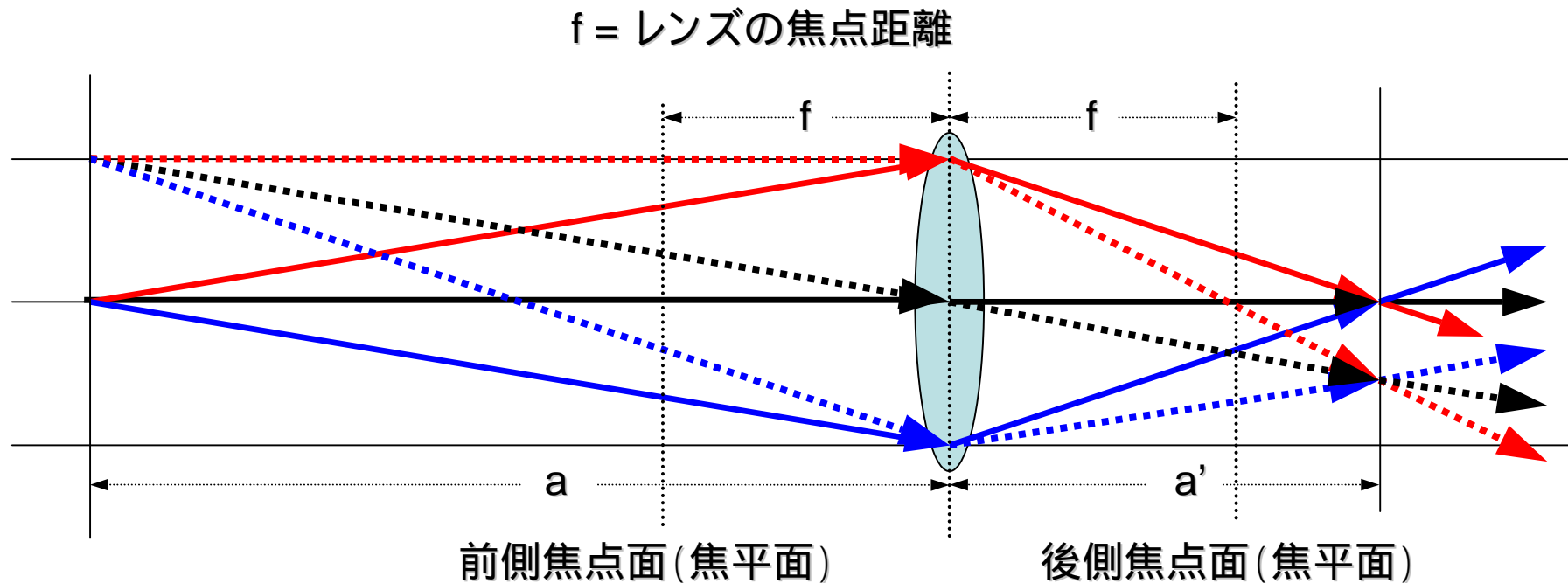


# レンズに斜めに入射する平行光の場合



- 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

# 点光源の場合

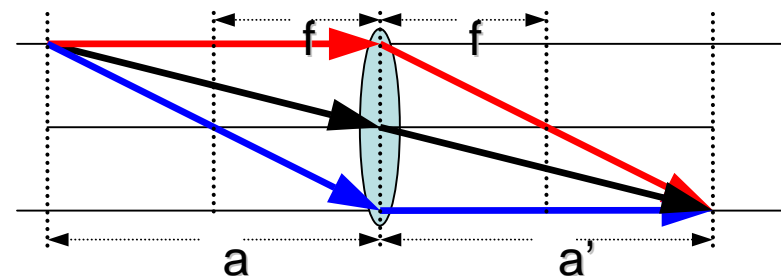
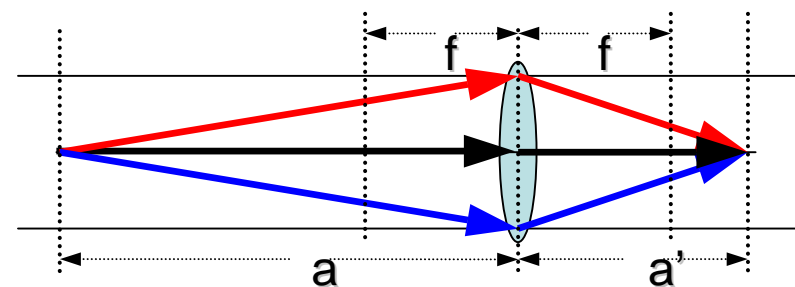
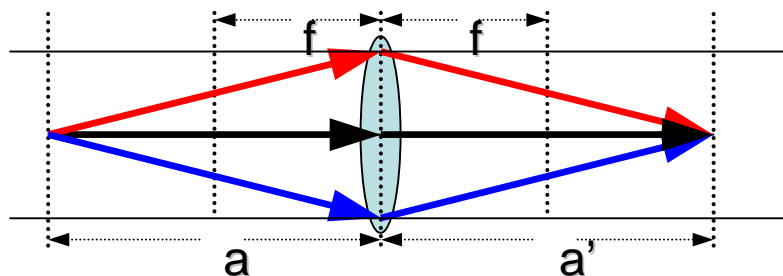


- 一点から来た光線は焦点距離より遠くの一点で交わる
- レンズの中央を通った光線は屈折しない
- 斜めから来た光は中央から外れた位置で交わる

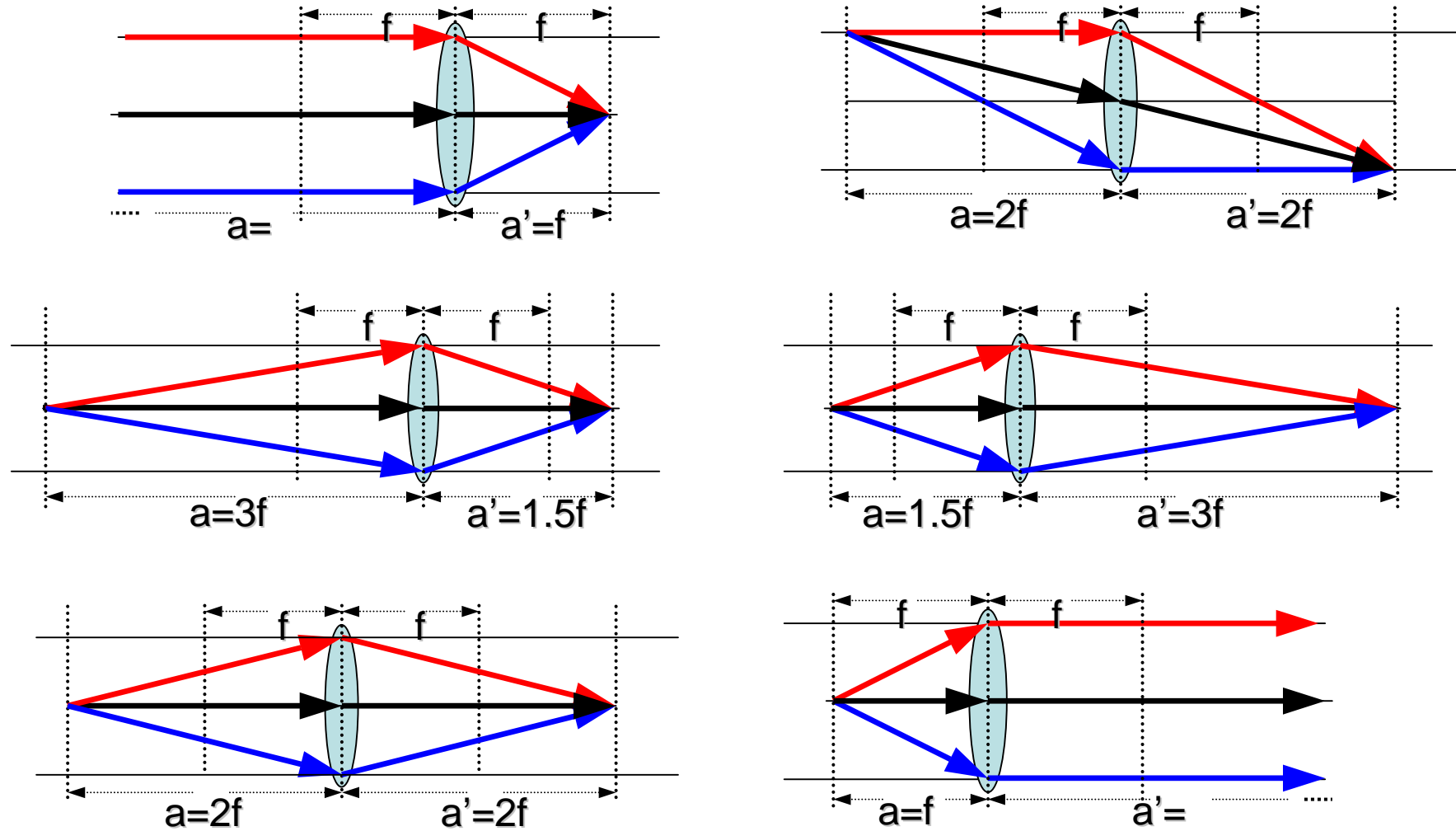
# $1/f = 1/a + 1/a'$ の関係

- 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
  - レンズから垂直距離で  $a$  離れた一点から出た光
  - レンズから垂直距離で  $a'$  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



# 結像の仕組み

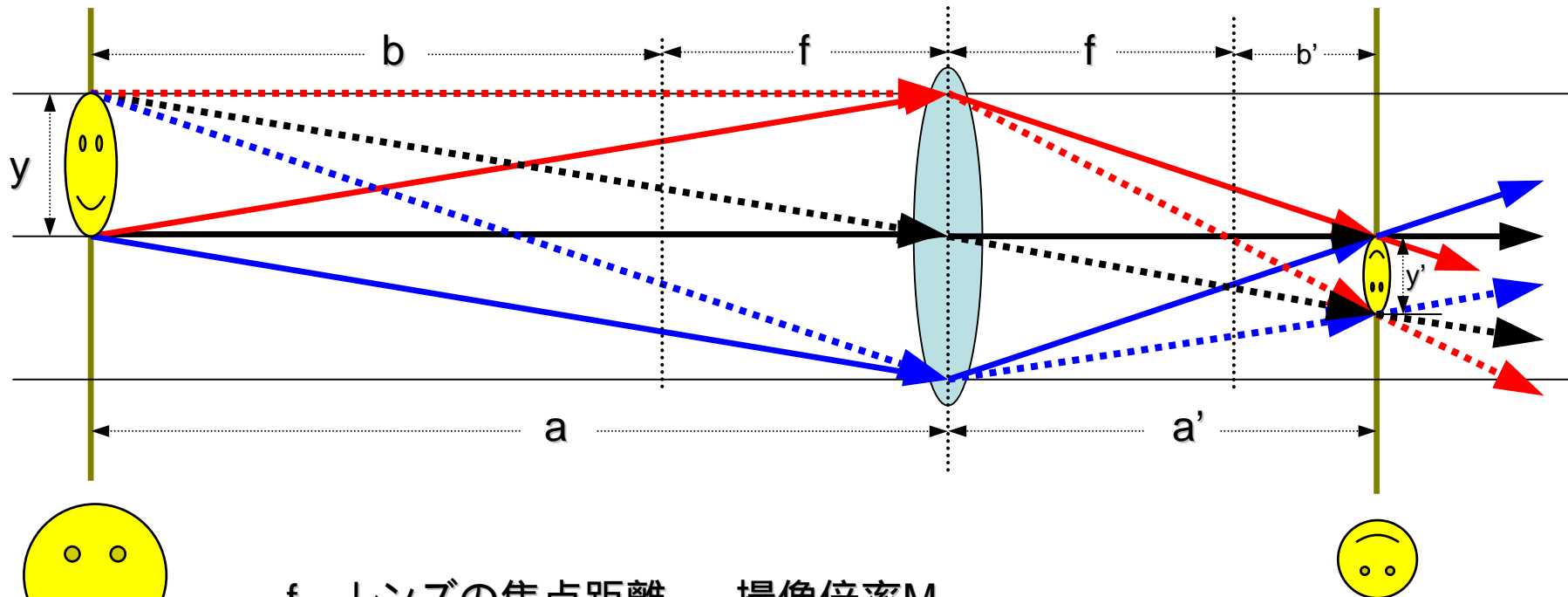
- レンズを通して再び一点に集まる光
  - 集まった場所に実像を結ぶ(結像)
- 結像位置にスクリーンやフィルムを置く
  - →像が映る

# 結像の仕組み (被写体が $3f$ の距離)

被写体位置

レンズ主平面

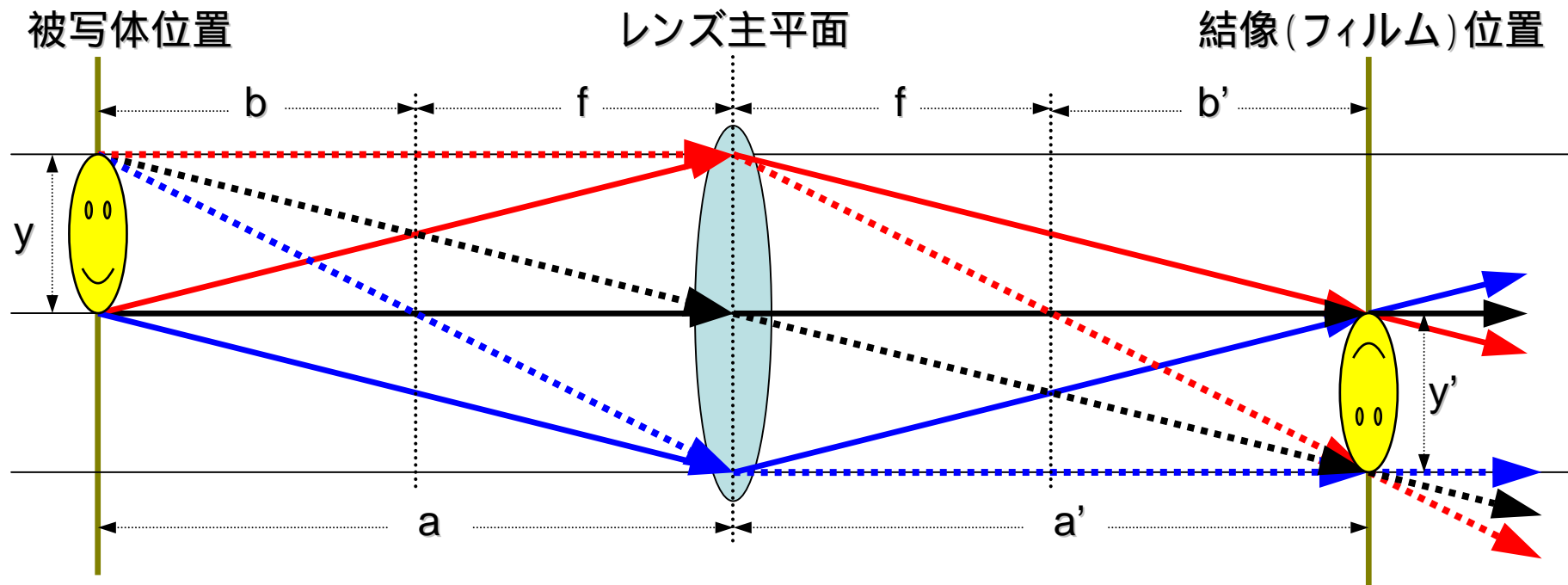
結像(フィルム)位置



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

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

# 結像の仕組み (被写体が $2f$ の距離)



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

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

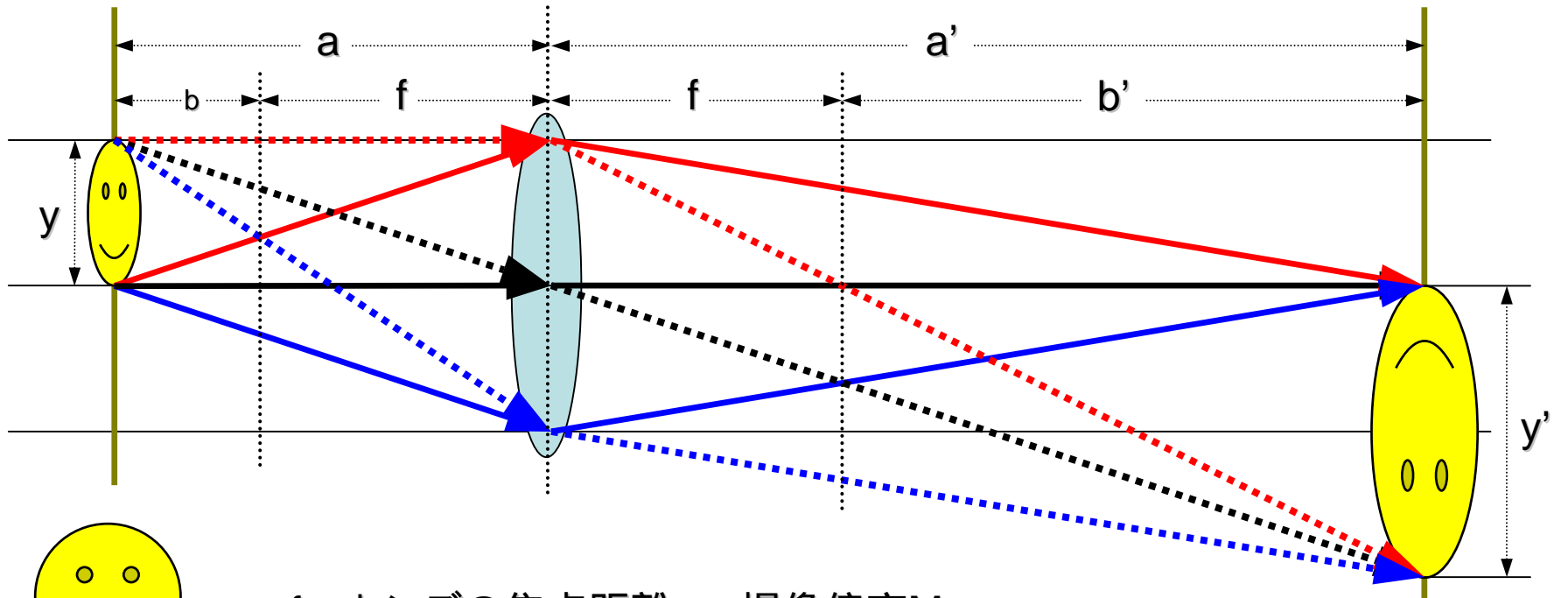


# 結像の仕組み (被写体が $1.5f$ の距離)

被写体位置

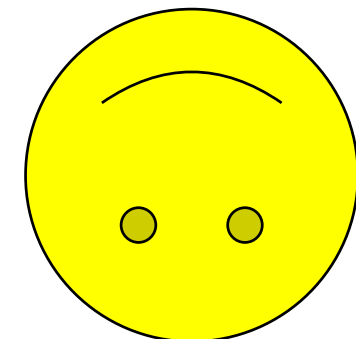
レンズ主平面

結像(フィルム)位置



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

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

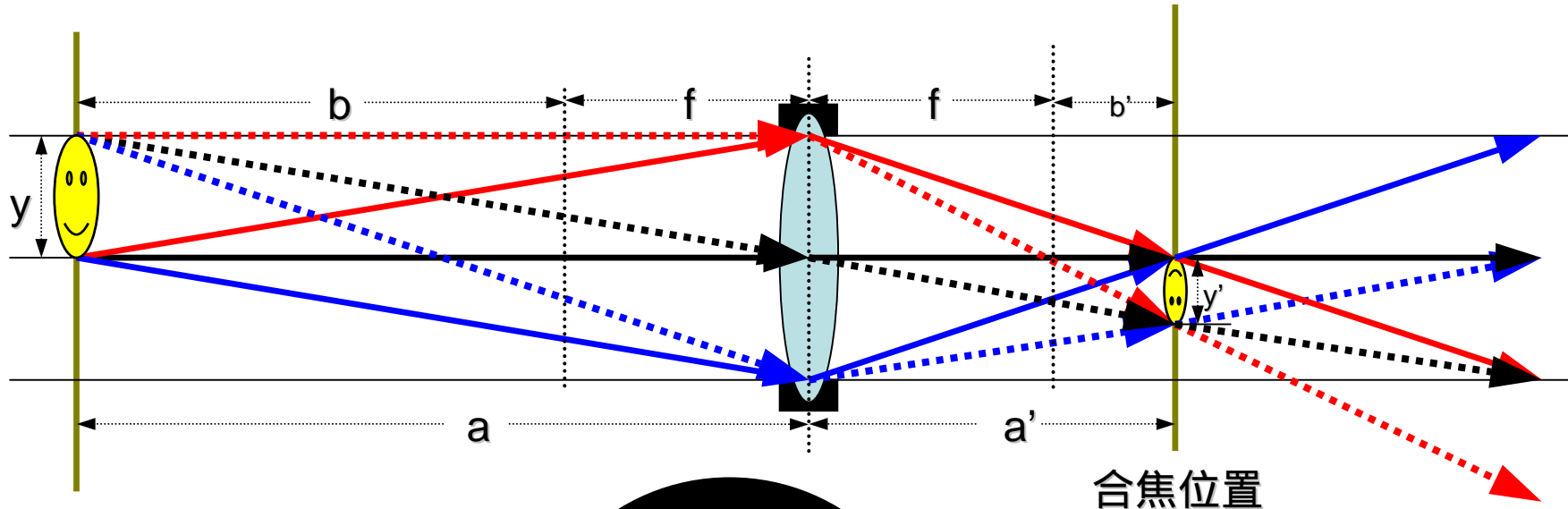




# 開口絞りとボケ (被写体にフォーカス)

物体にフォーカス

フィルム位置

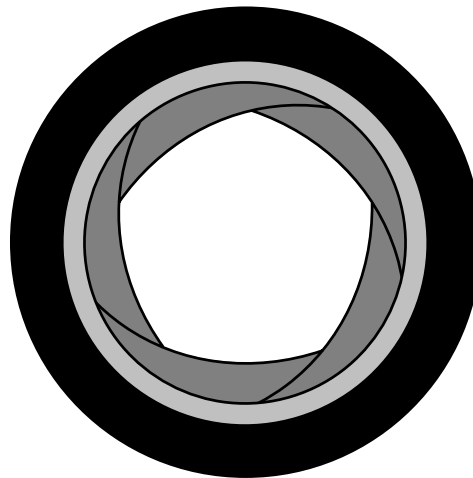


撮像倍率M

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

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

$$= 0.5$$

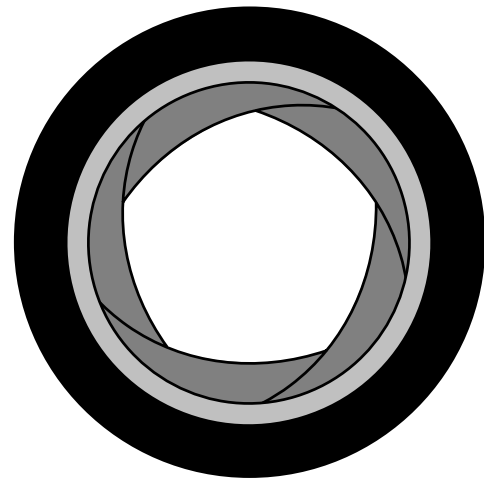
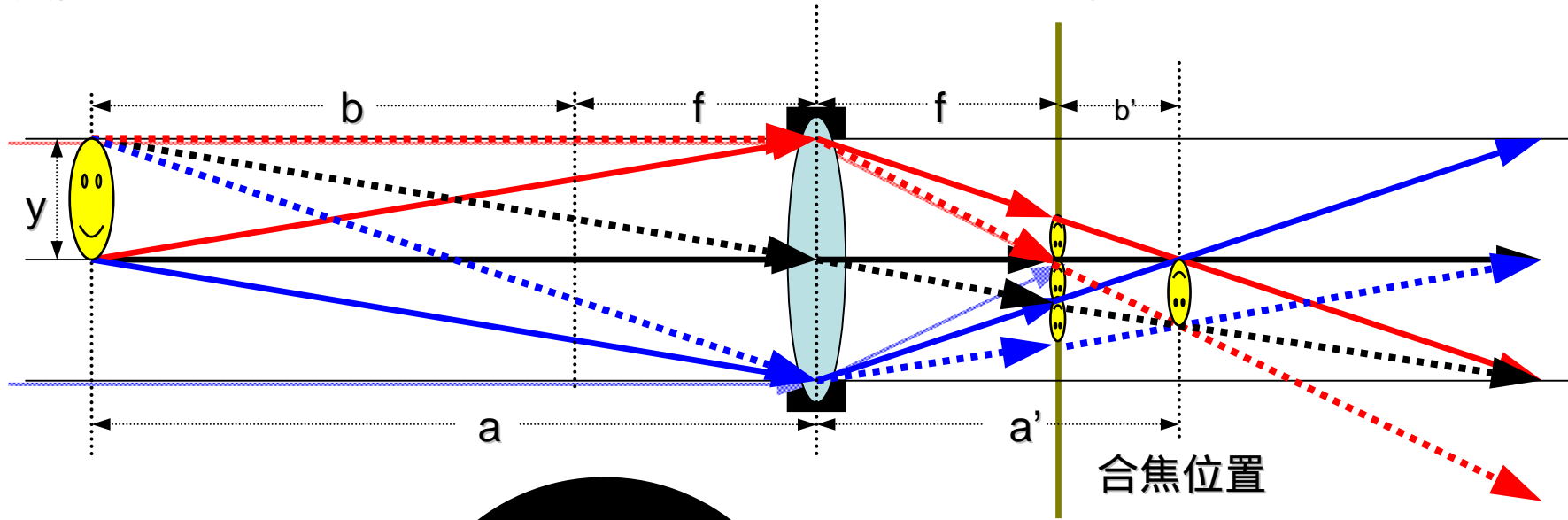


レンズの絞り

# 開口絞りと前ボケ(遠くにフォーカス)

無限遠にフォーカス

フィルム位置



レンズの絞り

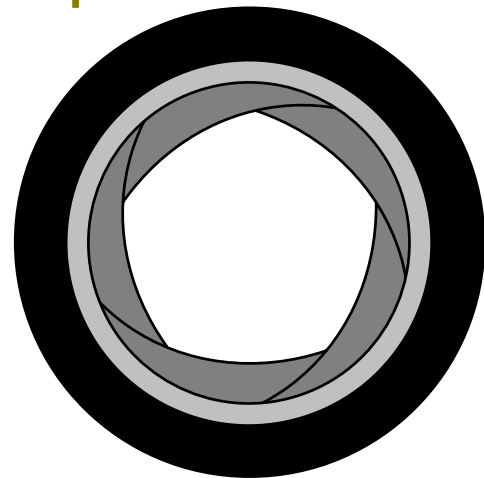
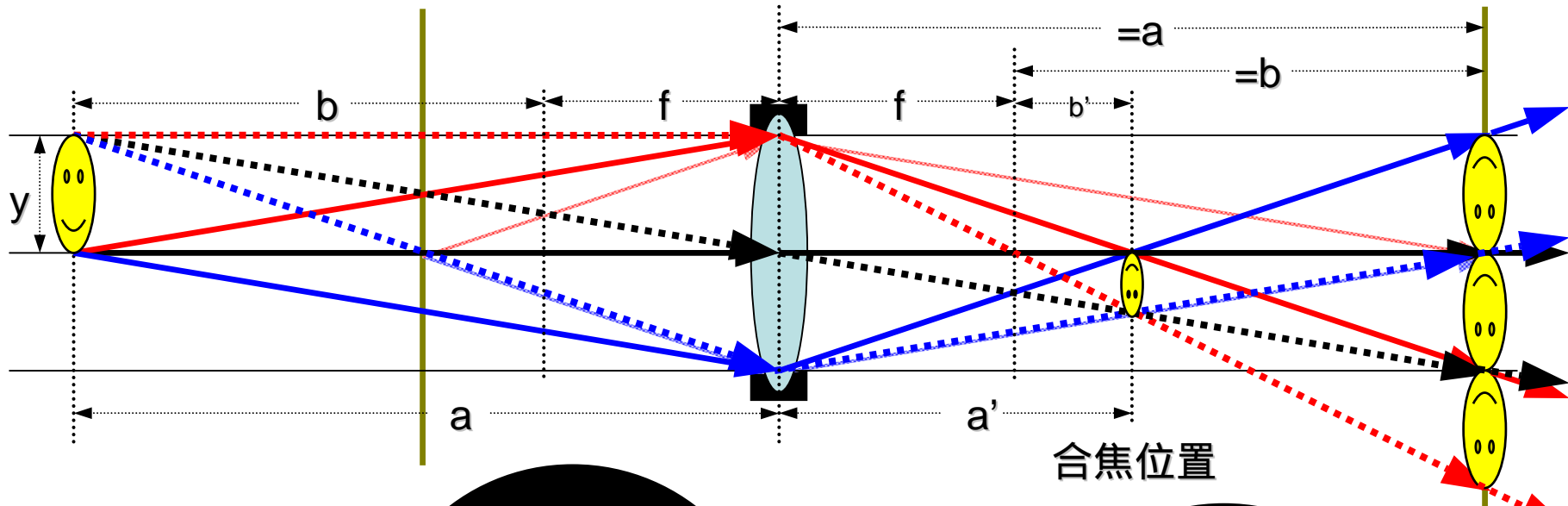


前ボケ

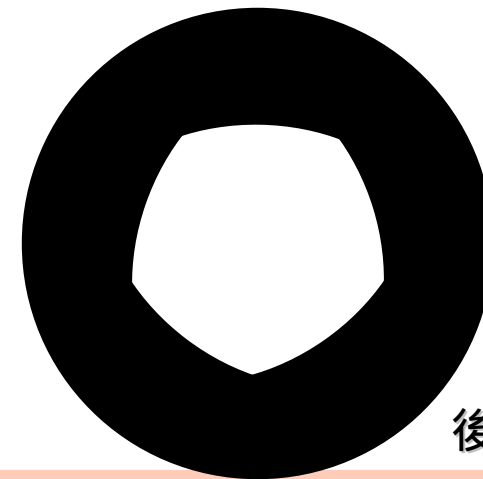
# 開口絞りと後ボケ(近くにフォーカス)

f の 1.5 倍の距離にフォーカス

フィルム位置

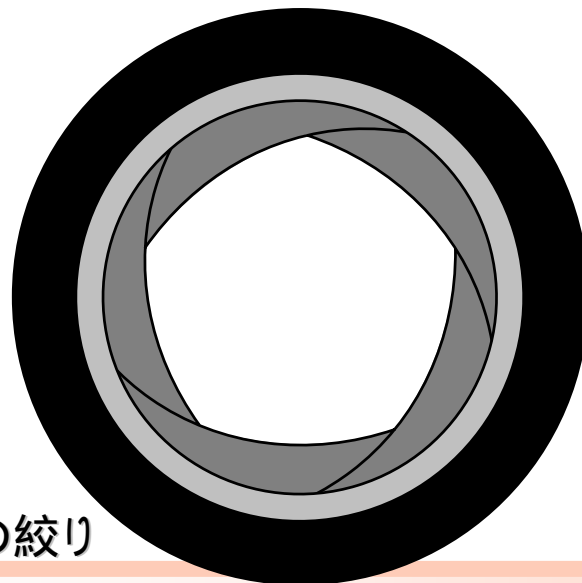
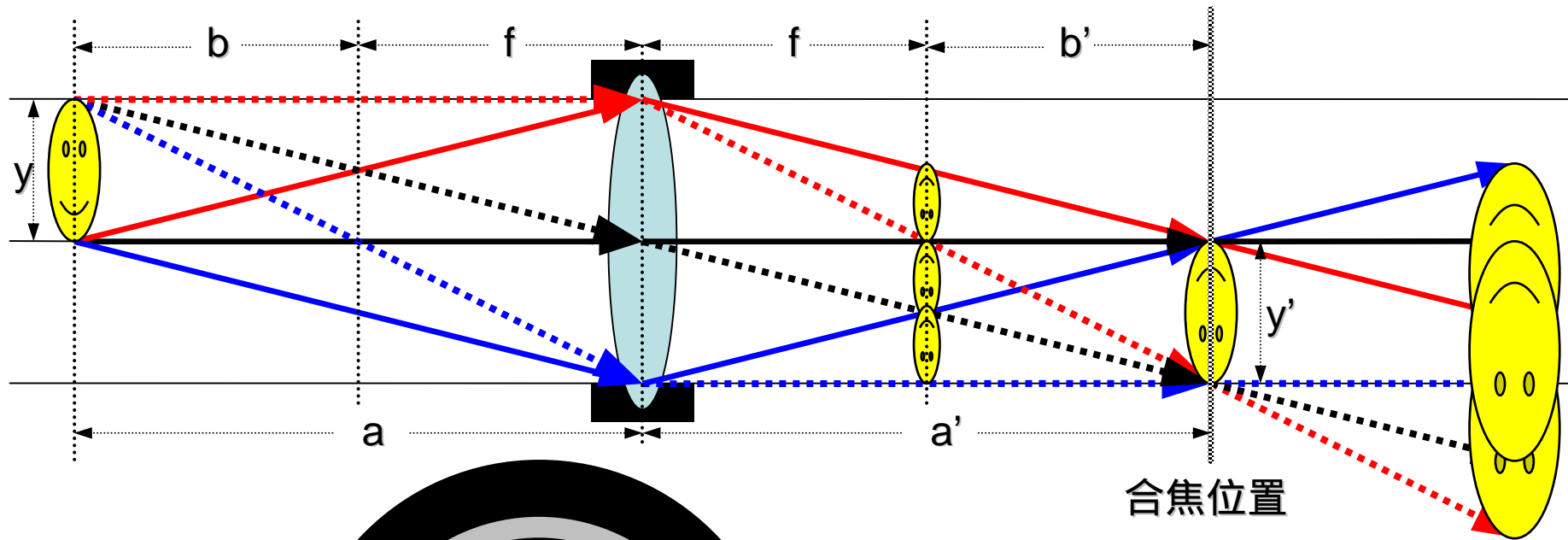


レンズの絞り

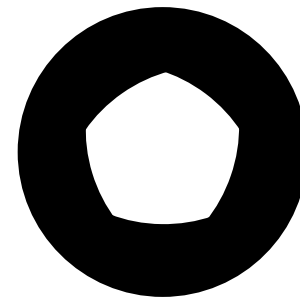


後ボケ

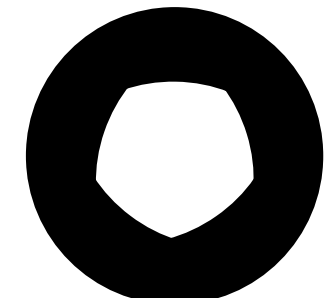
# 絞りの大きさとボケ



レンズの絞り

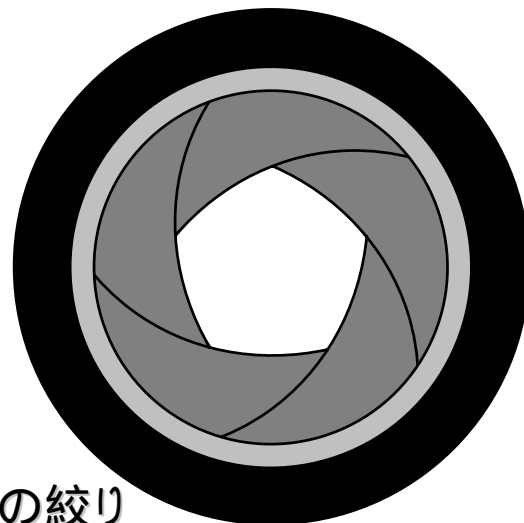
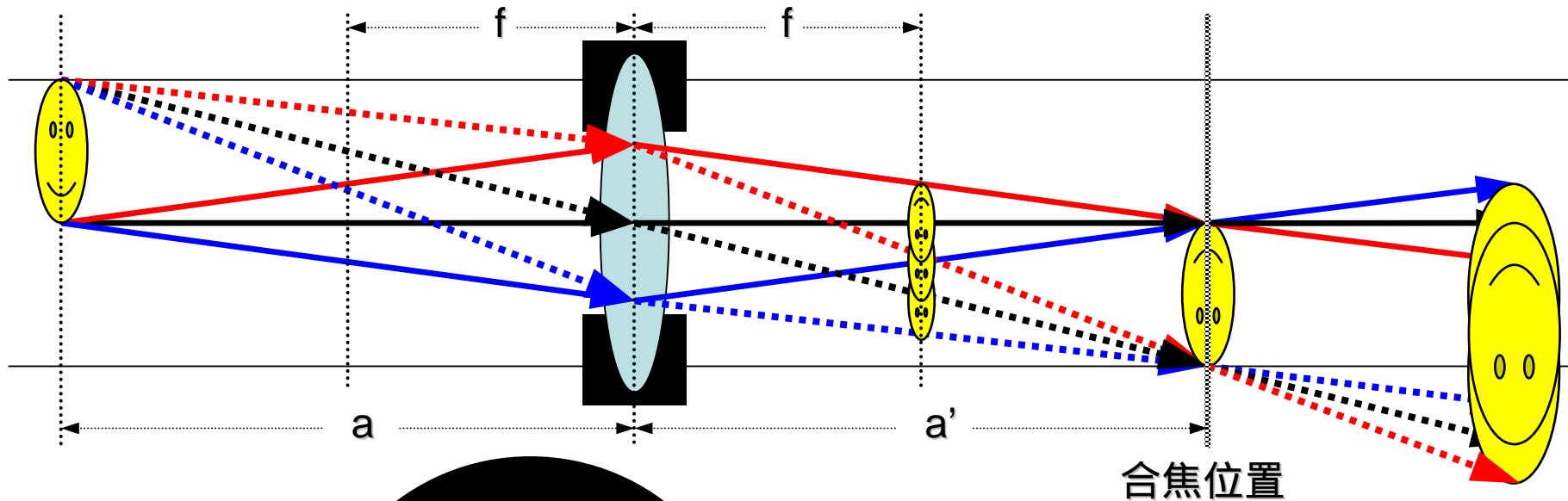


前ボケ

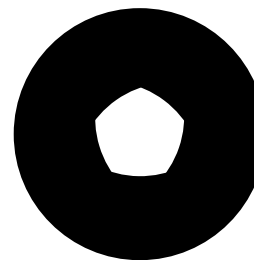


後ボケ

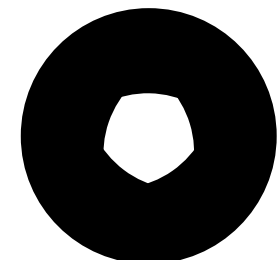
# 絞りの大きさとボケ



レンズの絞り

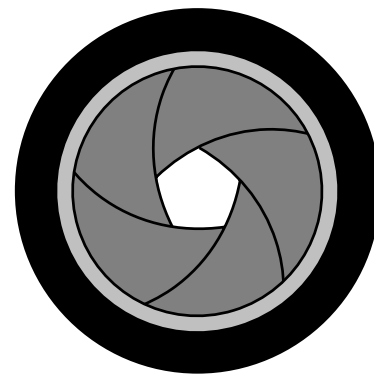
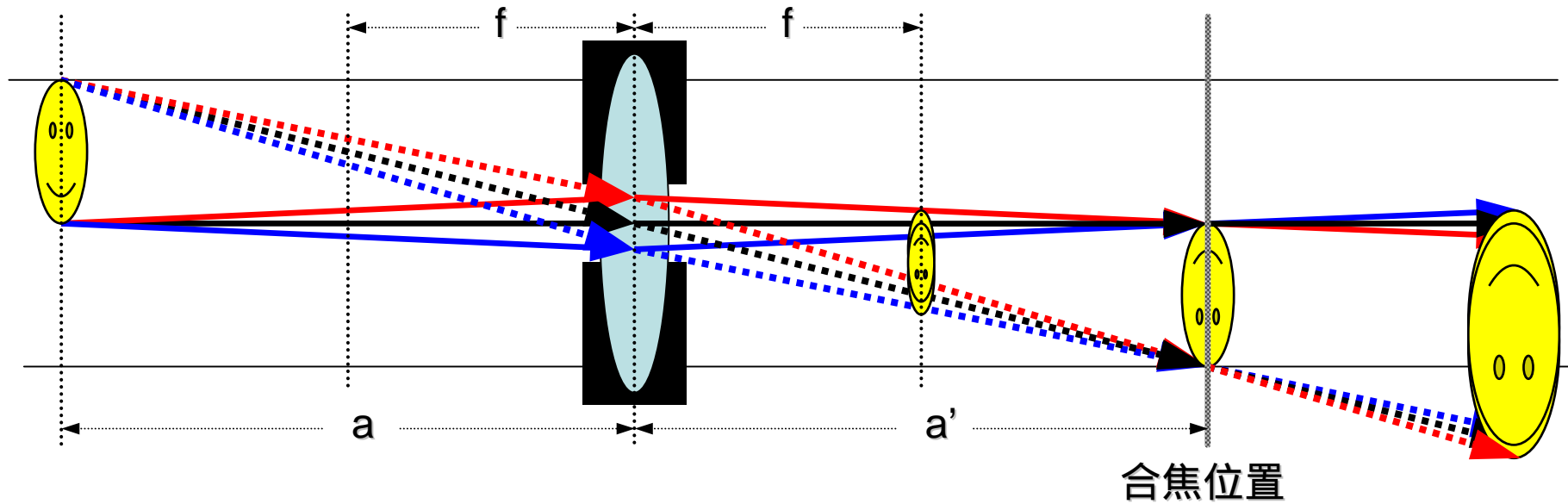


前ボケ

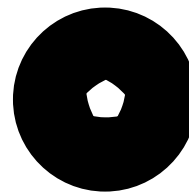


後ボケ

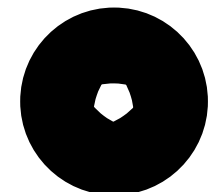
# 絞りの大きさとボケ



レンズの絞り

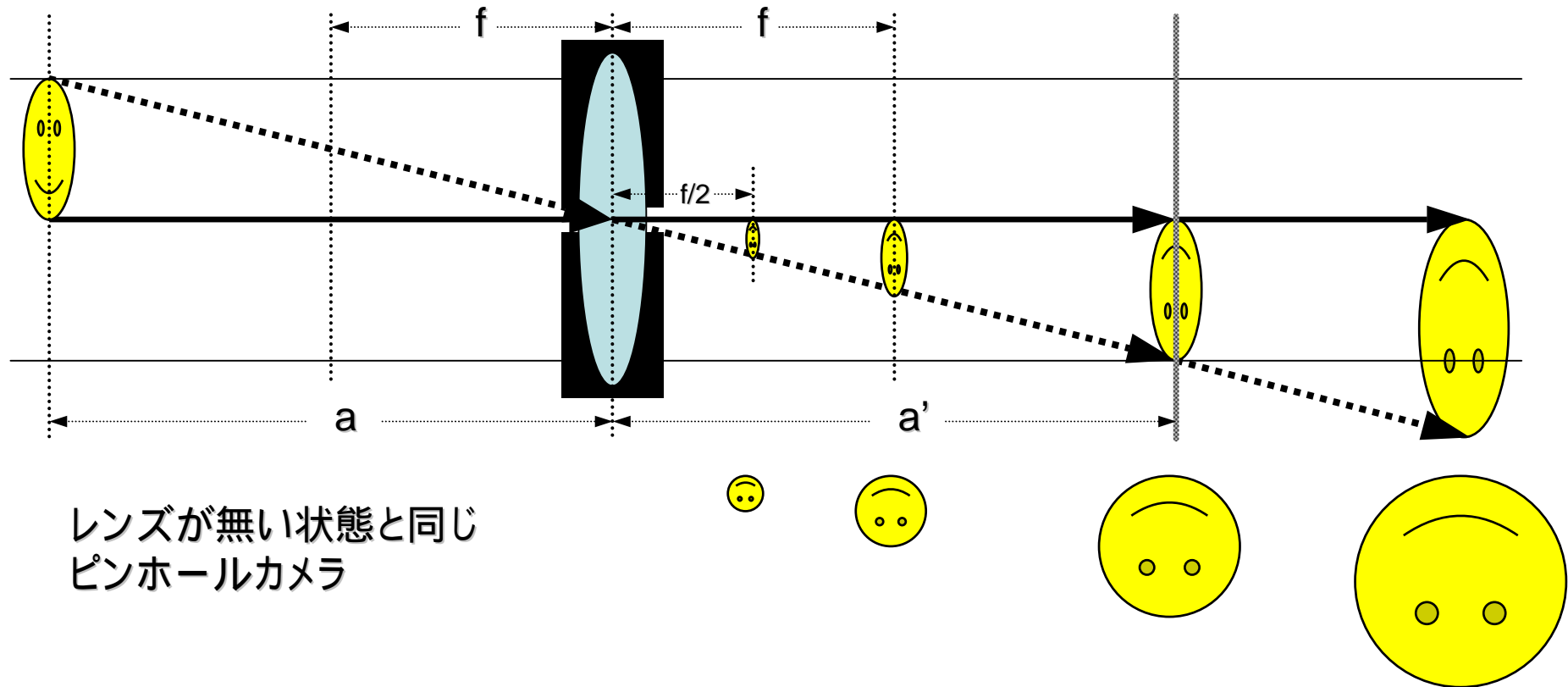


前ボケ



後ボケ

# 絞りの大きさとボケ



レンズが無い状態と同じ  
ピンホールカメラ

ムケテ、未来。

CEEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

# レンズの収差



# 収差とは

- 実際のレンズは理論どおりには結像しない
  - 理論上の近似と実際のずれ
  - レンズの設計 / 製造上の制限
  - 光と媒質(レンズ素材)の性質
- さまざまな問題が発生する
  - 像がボケる
  - 色が分離する
  - 像が歪む
  - etc.
- これらレンズの諸問題を収差と呼ぶ

# 単色収差(近軸理論とのずれに起因)

- 結像の理論は実際には近似
  - 特殊な極限でのみ成り立つ
  - 近軸理論(近軸光学)またはガウス光学
    - $\sin(\theta) \approx \theta$
  - この条件を満たさない場所では近似に過ぎない
    - レンズの極中央付近を通る光線(近軸光線)でしか成り立たない
- レンズの周辺部分を通る光線は近軸理論と大きくずれる
  - 近似と実際のずれが収差となって現れる
- 近軸理論とのずれに起因する収差
  - ザイデル収差(ザイデルの5収差)
  - または単色収差(単波長でも発生)

# 色収差(波長による屈折率の違いに起因)

- 単色収差(サイデル収差)がなくても発生する
  - 光(電磁波)の屈折率は波長にも依存する
    - 波長毎に結像の位置が異なる
  - 個々の波長がそれぞれ完璧に結像しても発生

# 主な収差の種類

- 単色収差 (ザイデル収差)
  - 球面収差
  - コマ収差
  - 非点収差
  - 像面湾曲
  - 歪曲収差 (ディストーション)
- 色収差
  - 軸上色収差
  - 倍率色収差

ムケテ、未来。

CEEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

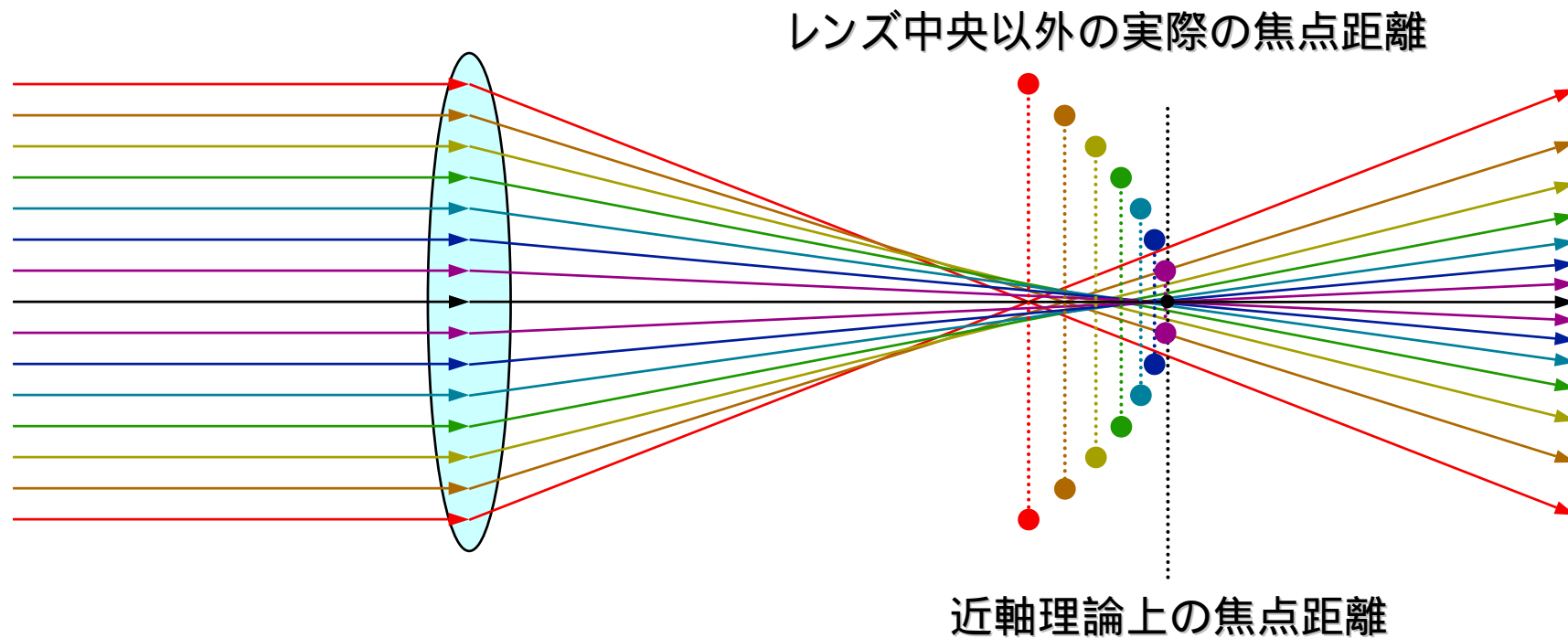
# 球面収差

Spherical aberration

# 球面収差 (Spherical aberration)

- レンズ中央と周辺での焦点距離のズレ
  - 屈折した光線が等距離に焦点を結ばない
- 球面レンズで発生
  - レンズの屈折面が球面であるために発生

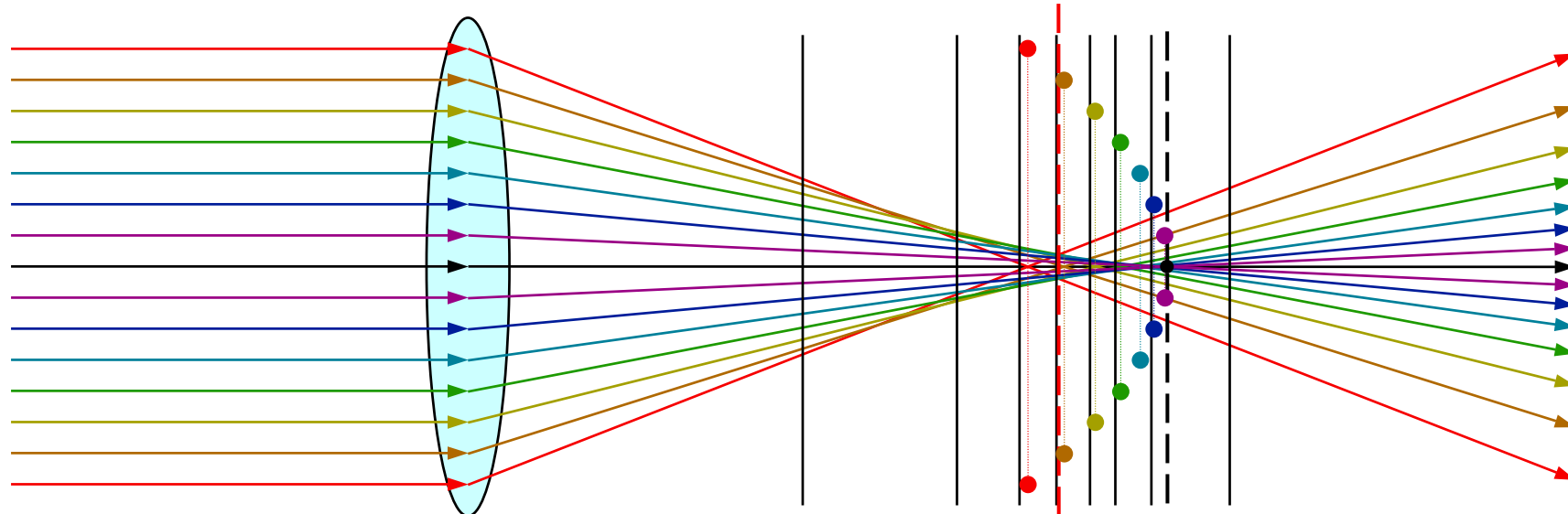
# 球面収差の原理



- 周辺部ほど焦点距離が近くなる

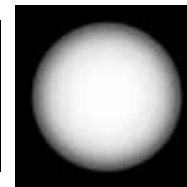
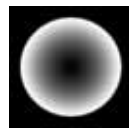
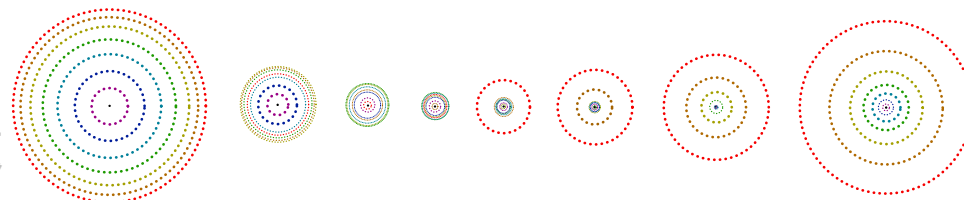
# 球面収差によるボケ方

光線がもっとも収束する距離(実質的な焦点面)



!近軸理論上の焦点距離

光線の収束



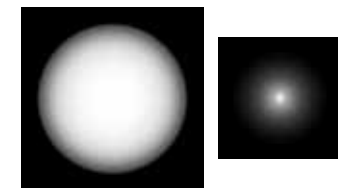
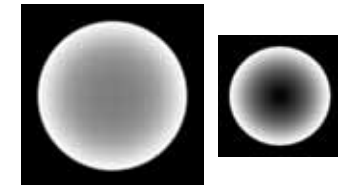
シャープな前ボケ(輪郭強調)

ソフトな後ボケ



# 球面収差の影響

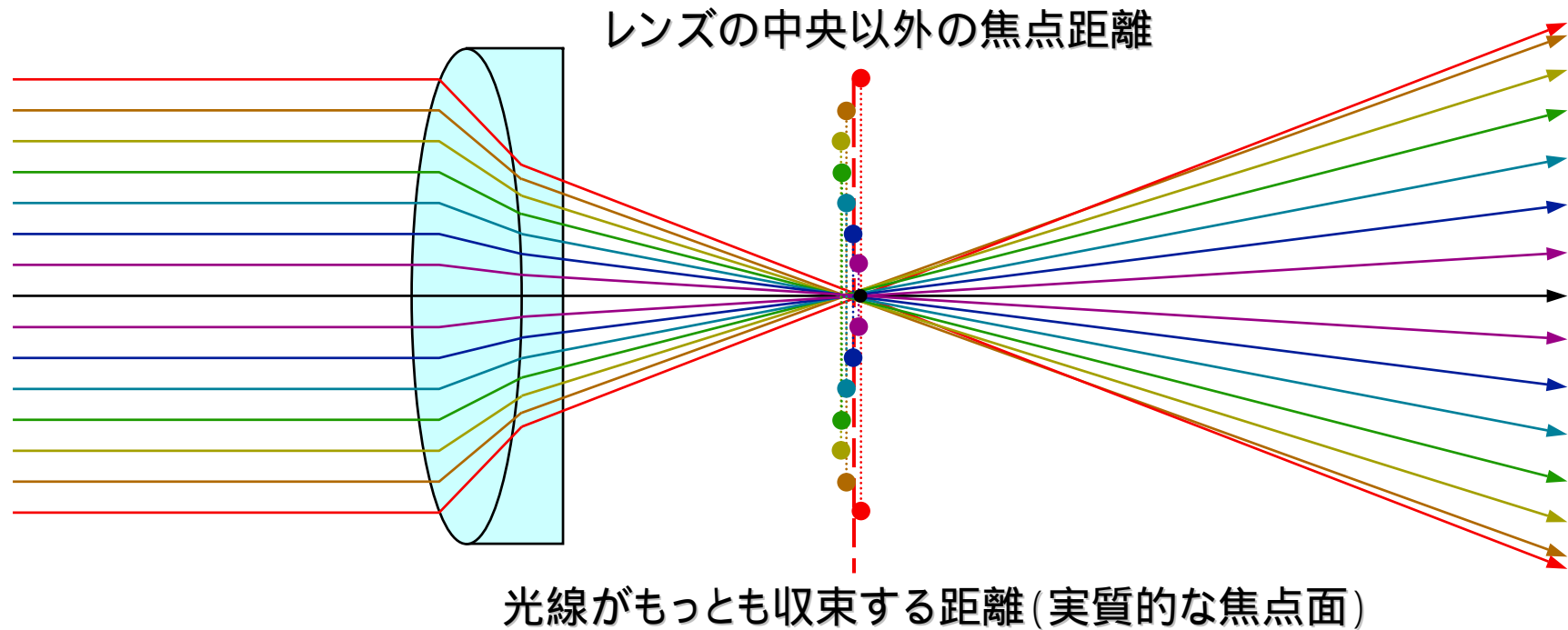
- 一点に結像しない
  - ピントが完全には合わず常に像がぼやける
- 絞りが大きいほど極端に影響が現れる
- 前ボケは周辺部が明るくなる
  - リング状の輪郭をもつシャープなボケ
- 後ボケは中央部が明るくなる
  - 中心の芯を柔らかいブラーが包むようなソフトなボケ
  - エッジ部分はソフト
- フォーカス付近(微妙なピンボケ)にもっとも影響が大きい



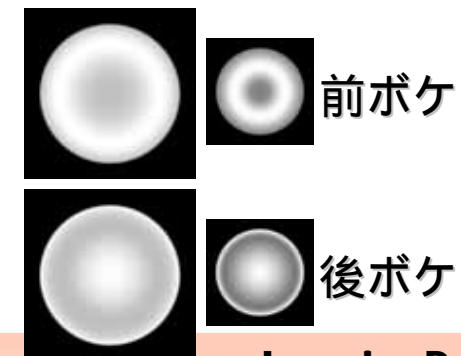
# 球面収差の補正

- **ダブルットレンズ (Doublet lens) を利用**
  - 凸レンズと凹レンズの二枚を組み合わせる
    - 凹レンズでは収差が逆になることを利用して打ち消す
  - 完全な補正はできない
- **トリプレットレンズ (Triplet lens) を利用**
  - ダブルットにさらに一枚レンズを加えて過剰な補正を打ち消す
  - 完全ではないがかなり良好な補正が可能
- **非球面レンズ (Aspherical lens) を利用**
  - 屈折面が球面ではない特殊なレンズ
  - 球面収差については完全な補正が可能

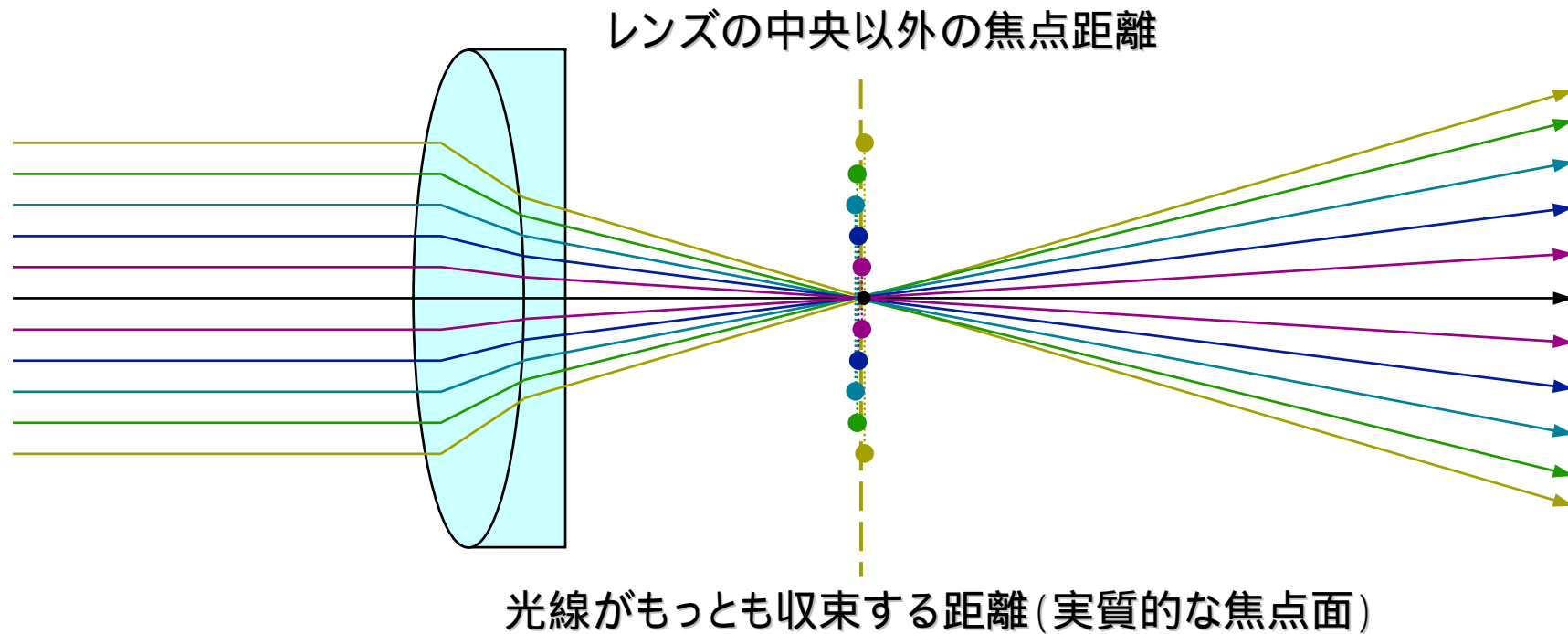
# ダブルレットによる適正補正(大きな絞り)



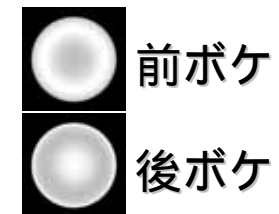
- 完全な補正はできない
- 補正しない場合と逆に近いボケ味(より複雑)
  - 前ボケはソフトでかつ中央部がやや暗い
  - 後ボケはシャープでかつ中央部がやや明るい



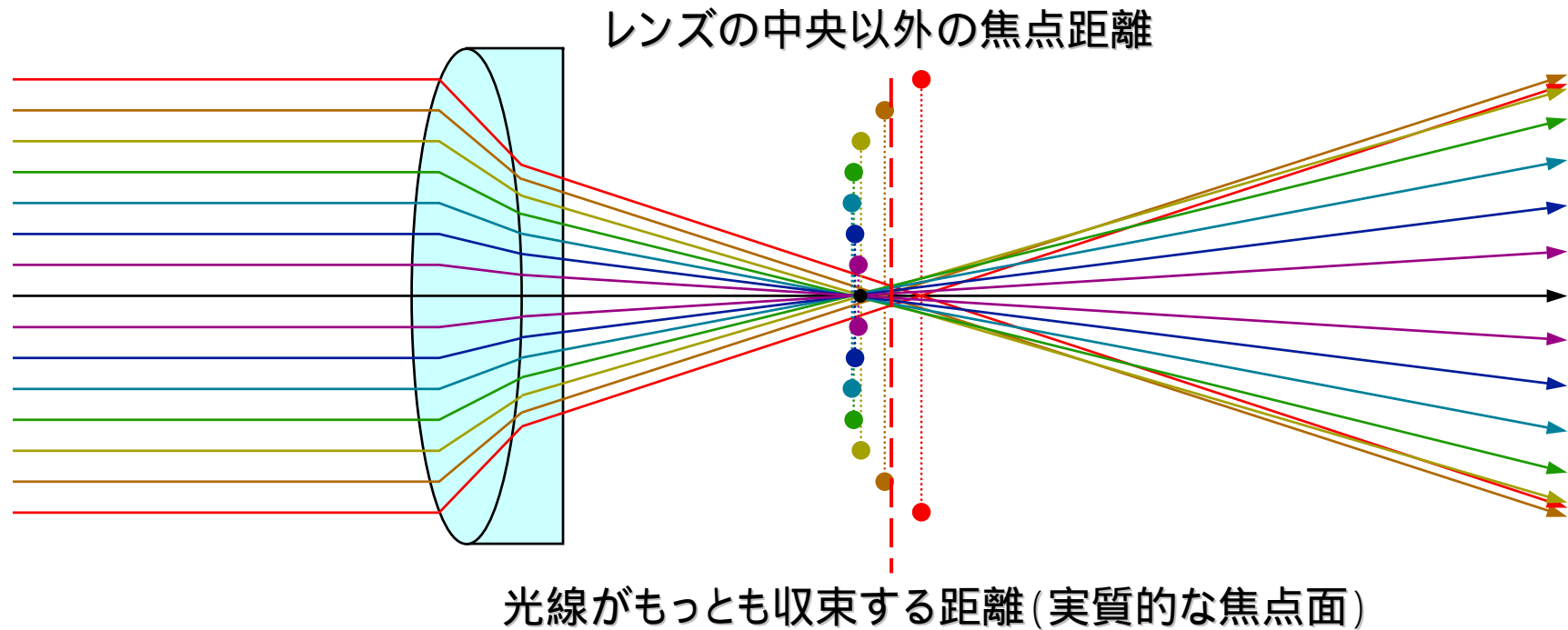
# ダブルレットによる適正補正(小さな絞り)



- 絞り込んで適切に補正するとボケはよりフラットになる
  - ボケ味の性質は同じ
  - 収差と補正の影響の出るピンボケ範囲が狭い
    - 大きな影響が出るのはかなり小さな(微妙な)ピンボケのみ
- 絞りによって適切な補正は変化する



# 同じ補正で絞りを開けると



- 周辺光が過剰補正になる
- 補正しない場合と逆に近いボケ味
  - 前ボケはソフト
  - 後ボケはシャープ

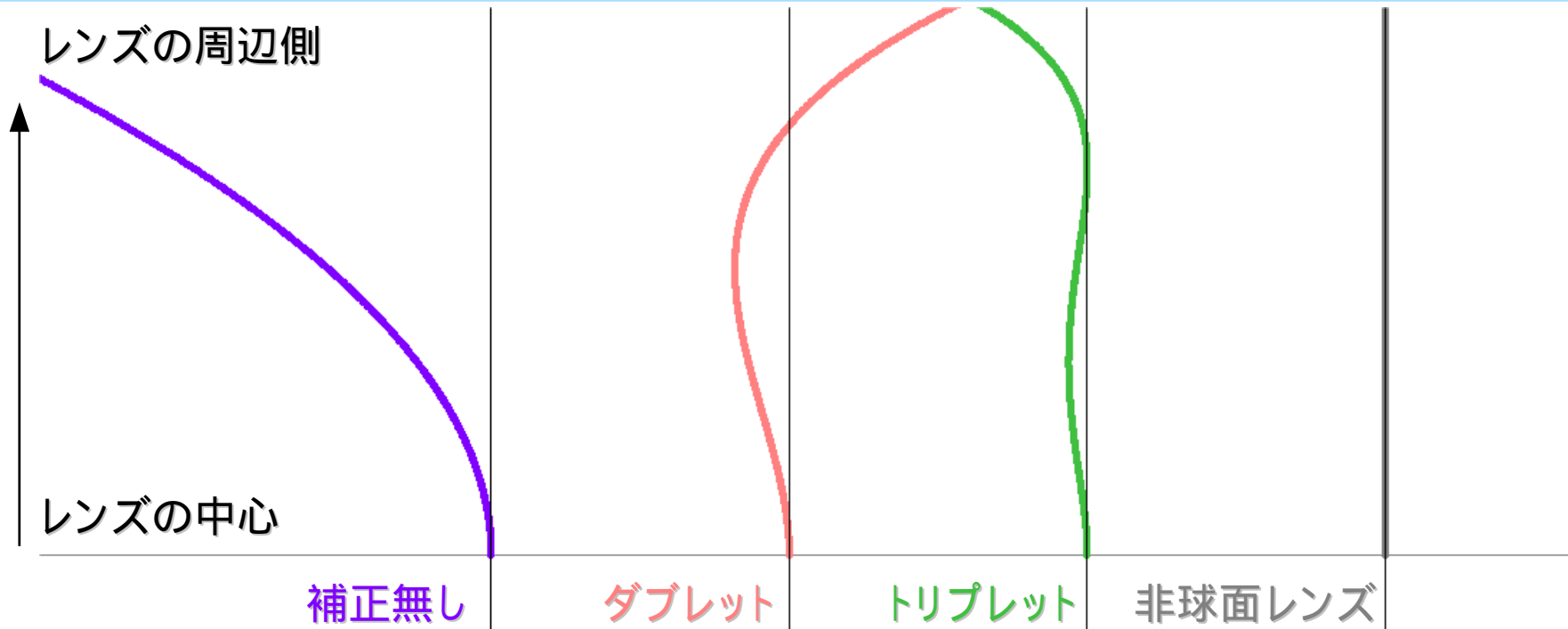


前ボケ



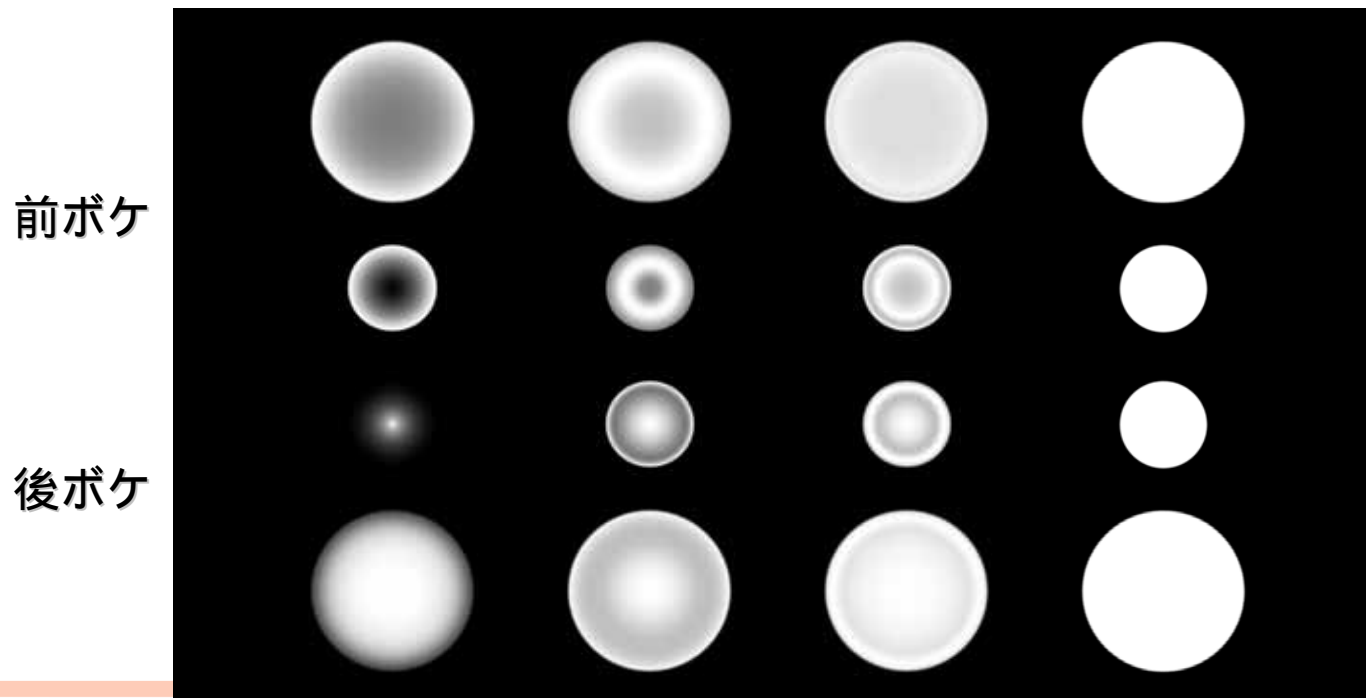
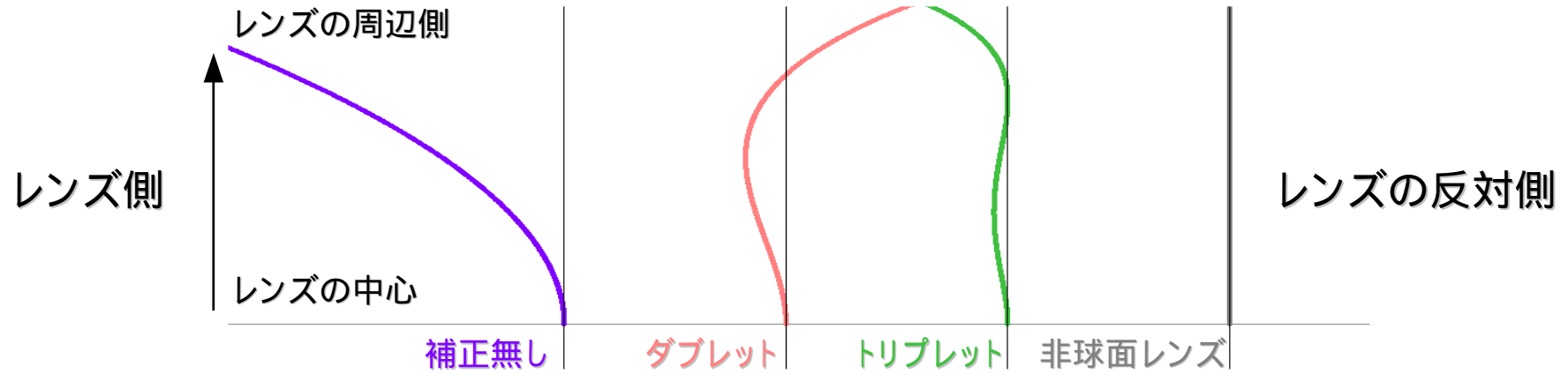
後ボケ

# 球面収差曲線(縦収差曲線)

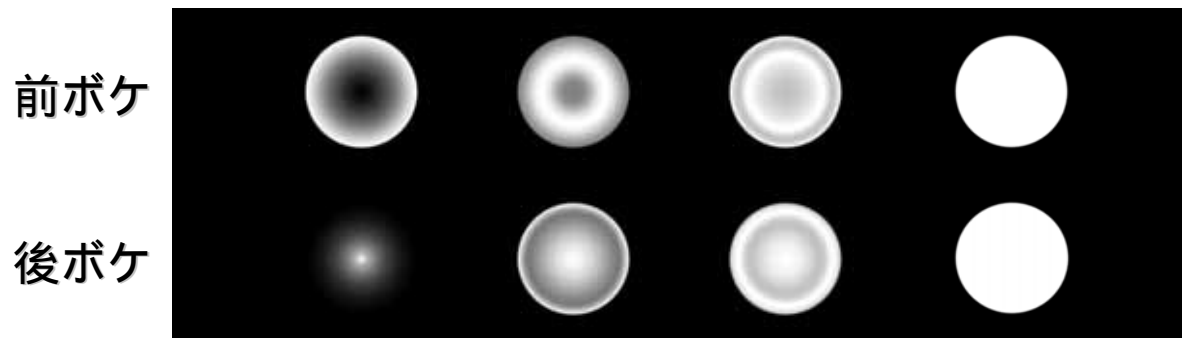
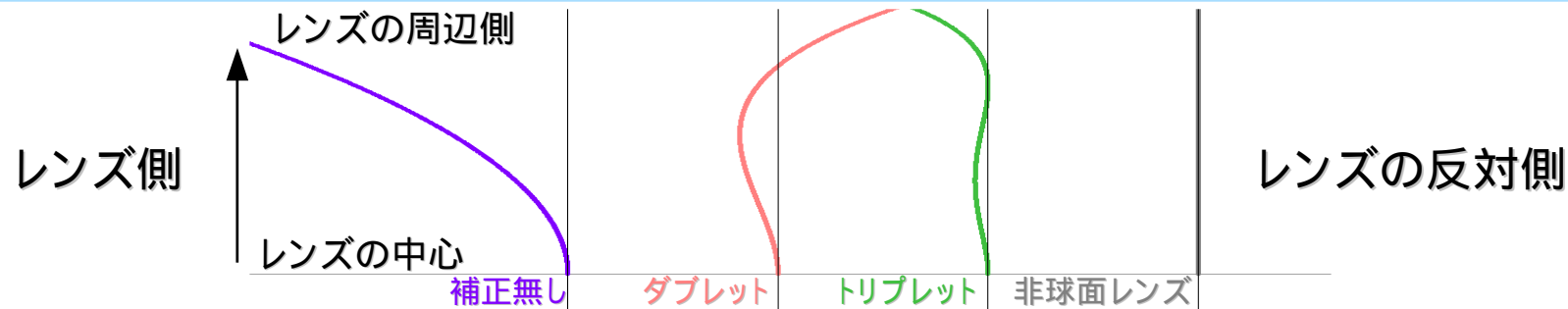


- 中央から離れた周辺光の焦点位置のズレ
- 揺れ幅が小さいほど良好な補正
  - シャープなフォーカス
  - フラットなボケ

# 球面収差の方向とボケ味



# 球面収差の方向とボケ味



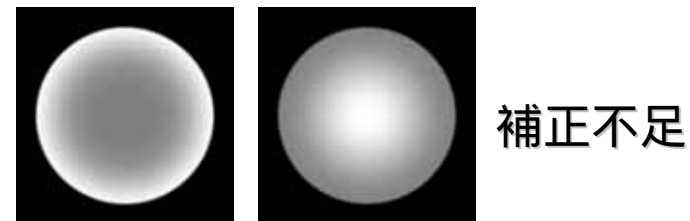
- レンズ端(グラフ上側)の焦点距離がレンズ側(グラフ左側)にずれる場合
  - 前ボケがシャープ(輪郭)
- レンズ端の焦点距離がレンズと反対側(グラフ右側)にずれる場合
  - 後ボケがシャープ(輪郭)
- 適切に補正されている場合
  - 前ボケの中央はやや暗くなる
  - 後ボケの中央はやや明るくなる



# 球面収差によるボケ味のコントロール

- 球面収差を意図的に残す
  - ソフトフォーカス
  - DC (デフォーカス・イメージ・コントロール) レンズなど

- 抑え気味に補正
  - 前ボケはシャープ
  - 後ボケはソフト



前ボケ

後ボケ

- 過剰気味に補正
  - 前ボケはソフト
  - 後ボケはシャープ



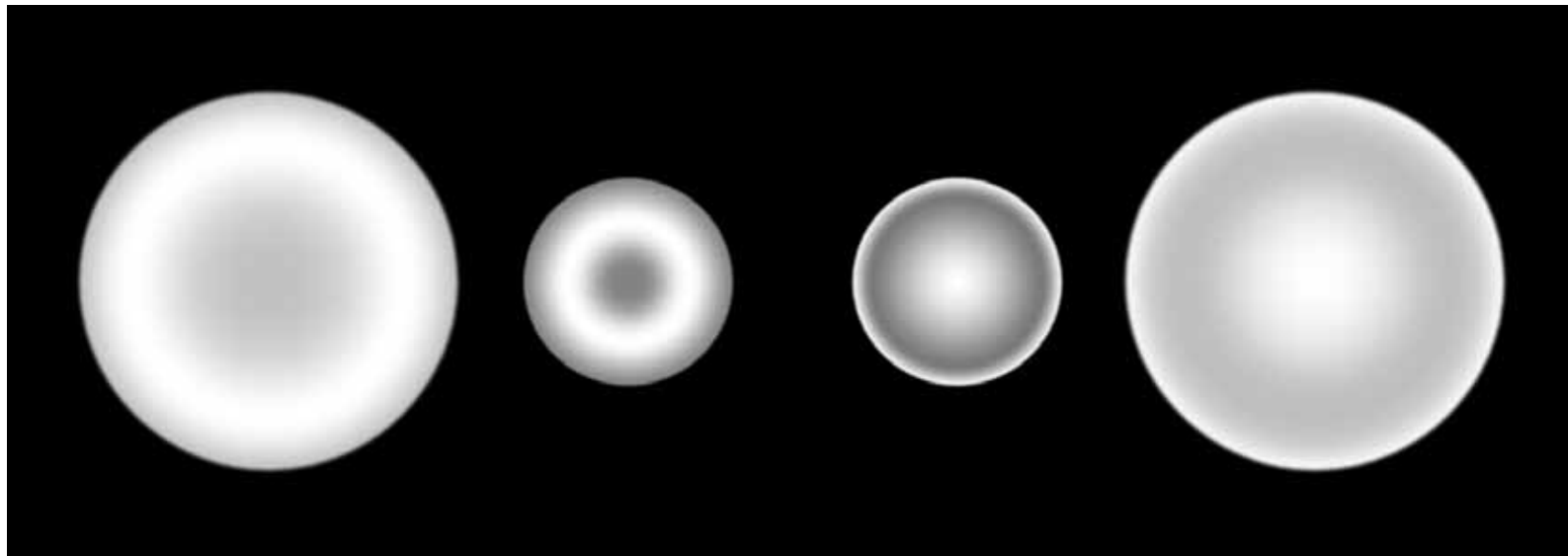
過剰補正

# 球面収差の補正とボケ味

- 高度な補正ほどシャープなフォーカス
  - ピントがくっきりと合う
- 一般に高級なレンズの方がフラットなボケ

# 球面収差の補正とボケ味

- 多くの普及帯レンズの補正では
  - 前ボケはソフトで中央部がやや暗い
  - 後ボケはシャープで中央部がやや明るい



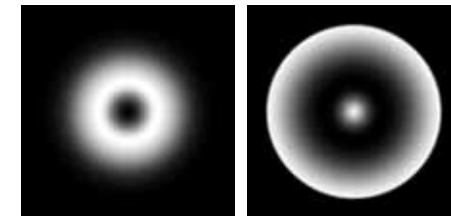
前ボケ

後ボケ

# 球面収差の補正とボケ味

- フォーカスに近いボケほど残収差が目立つ
- フォーカスから微妙に外れたボケ (僅かなピンボケ)

- 残収差が強い
- 絞りが大きいと特に目立つ
- 前ボケがドーナツ状
- 後ボケに輪郭と鋭いピーク



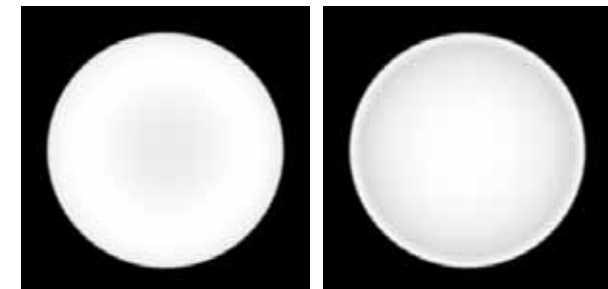
前ボケ

後ボケ

- フォーカスから離れた (大きな) ピンボケ
- 残収差はかなり軽減される
- 大きなピンボケはほとんどフラット
- 絞りが小さいとよりフラットになりやすい

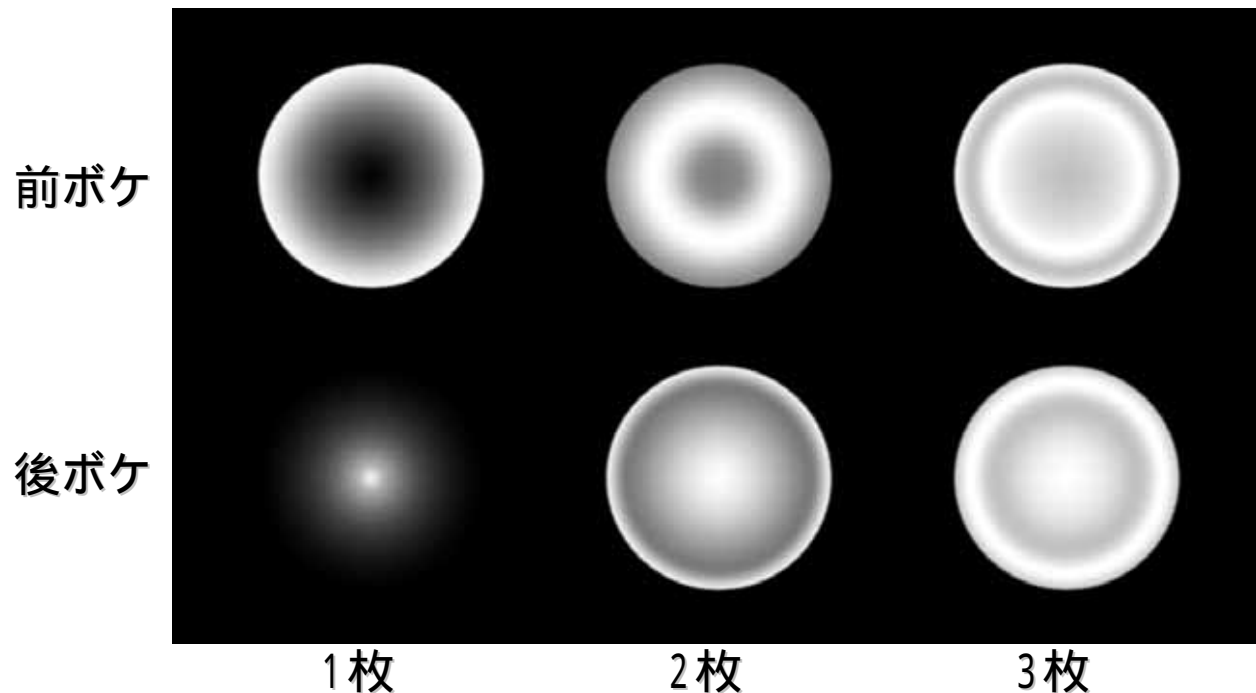
前ボケ

後ボケ



# 球面収差の補正とボケ味

- レンズ枚数が多いとボケ味も複雑になる
  - 前ボケと後ボケの性質が変化
  - 全般的には補正レンズが多いほどフラットになる



ムケテ、未来。

CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

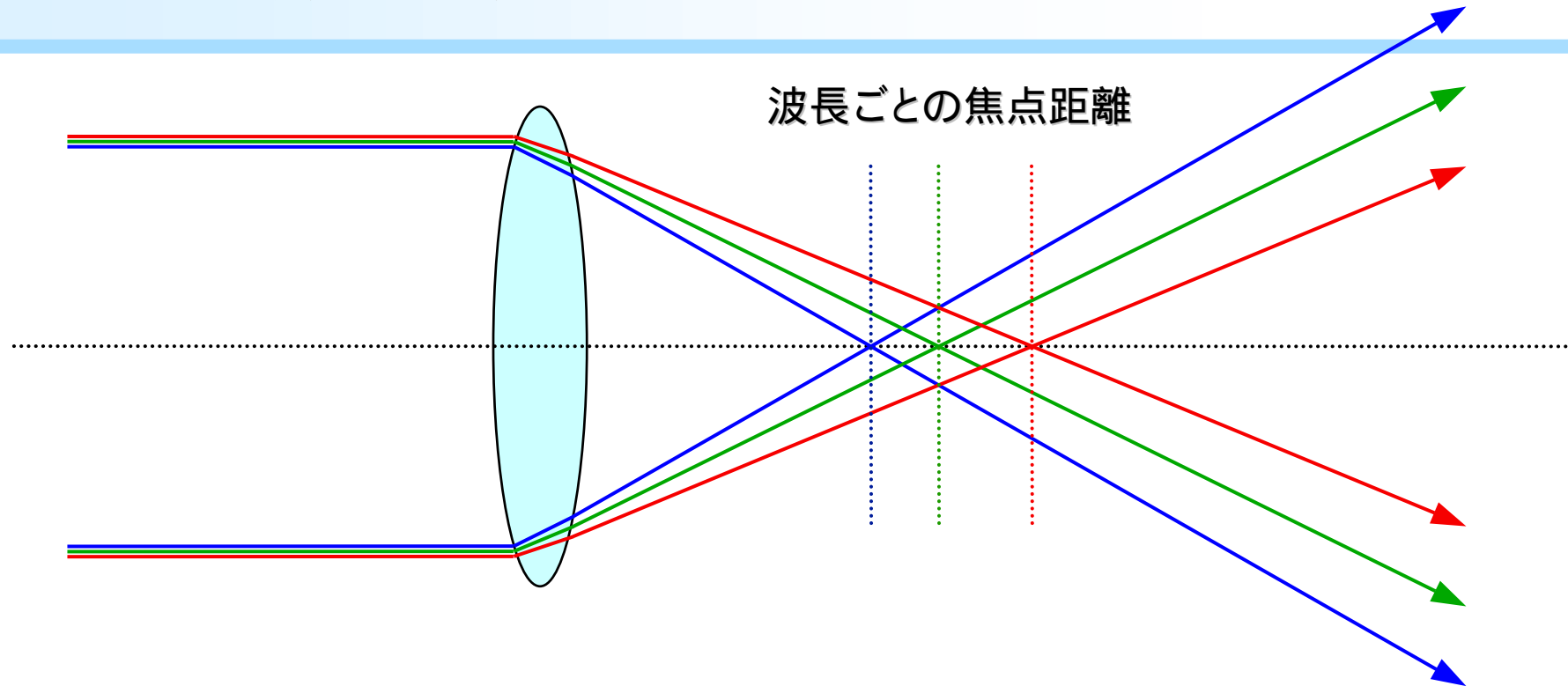
# 軸上色収差

Axial chromatic aberration

# 軸上色収差 (Axial chromatic aberration)

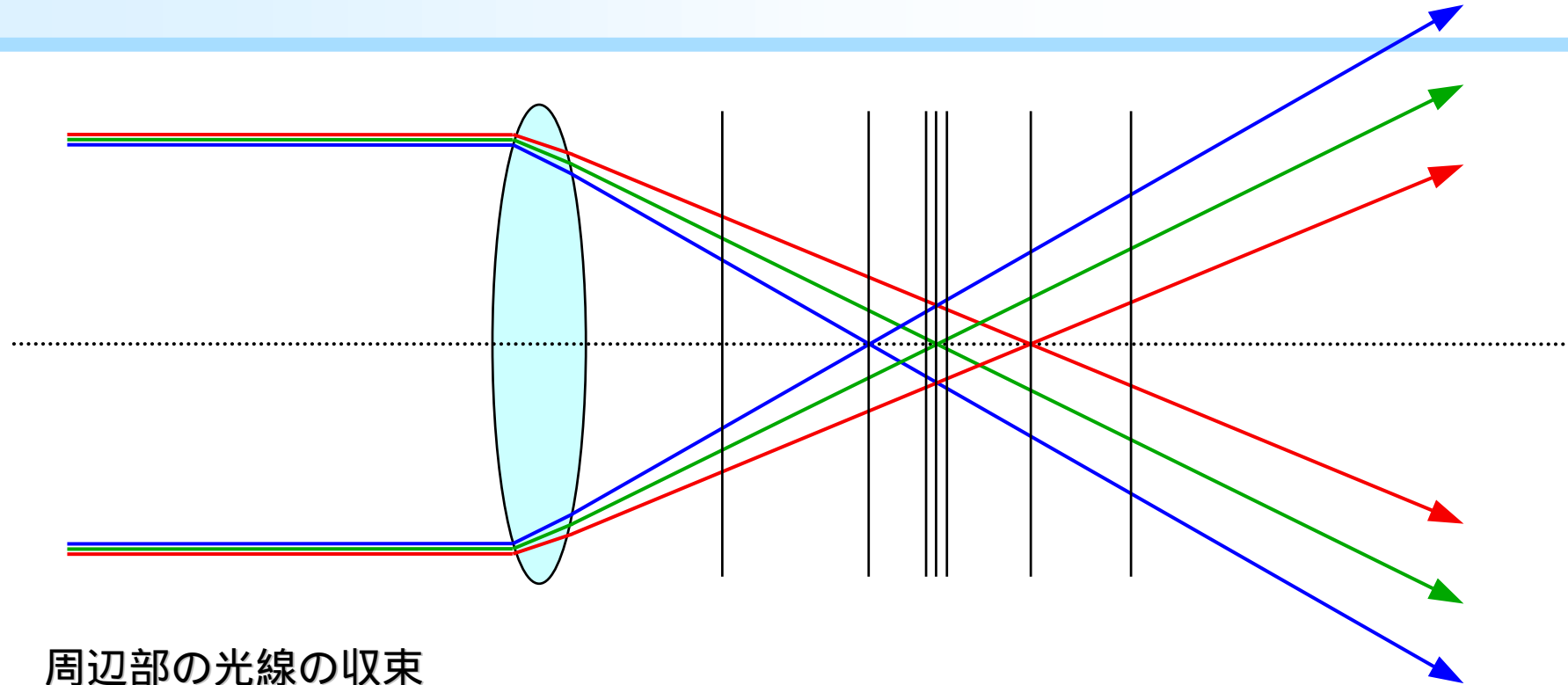
- または Longitudinal chromatic aberration
- 光の波長による焦点距離のズレ
  - 屈折した光が等距離に焦点を結ばない
- 波長によって屈折率が異なるために発生
  - 分散 (Dispersion)

# 軸上色収差の原理

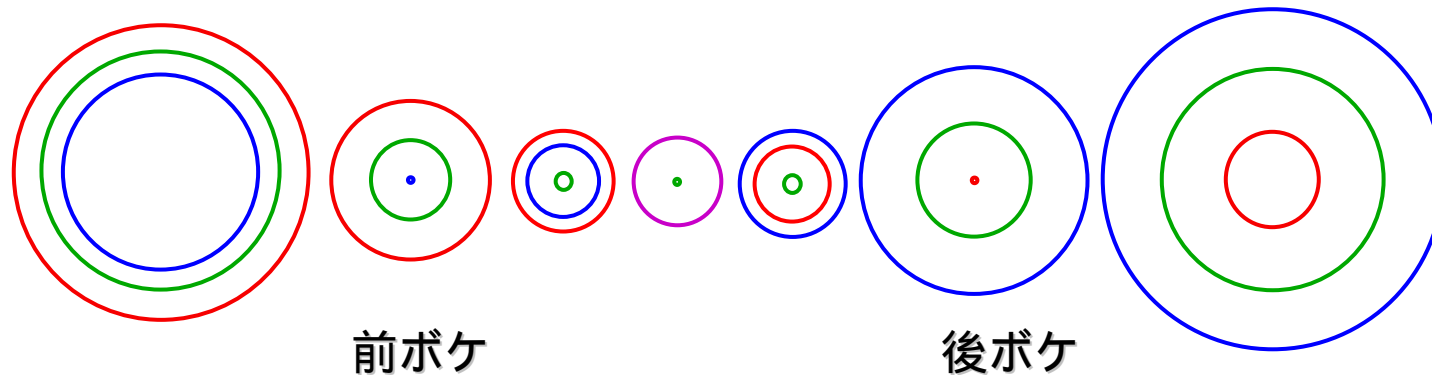




# 軸上色収差のボケ方

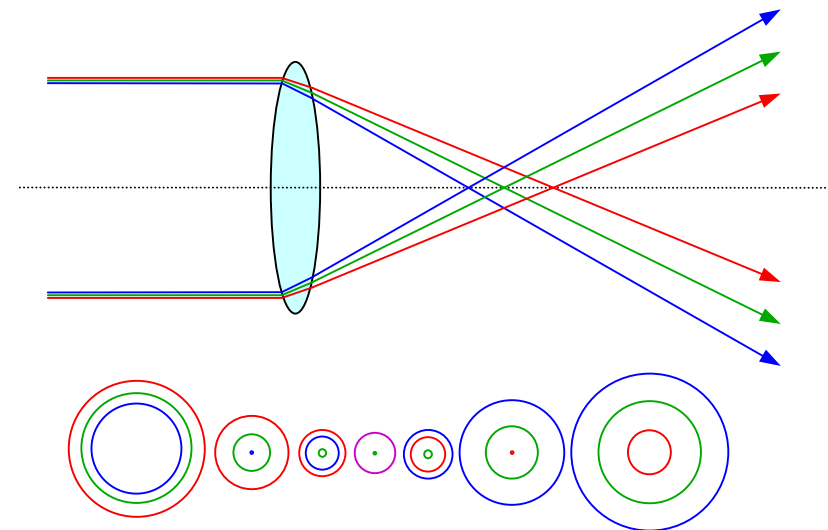


周辺部の光線の収束



# 軸上色収差の影響

- 前ボケに赤い輪郭
- 後ボケに青い輪郭
- フォーカス付近では紫の輪郭
- フォーカス近辺の方が相対的に大きな輪郭
- 望遠ほど目立つ
- 絞りが大きいほど目立つ



# 軸上色収差の補正

- 色消しレンズ
- ダブルレットやトリプレットで補正
  - 分散特性の異なるレンズの組み合わせ
  - 複数の波長(色)を一定の距離に結像できる
  - 全波長域での完全な補正はできない
    - 二次スペクトルが発生(残存色収差)
  - レンズの枚数や素材によって大きく性能が異なる

# アクロマート (Achromat) レンズ

- Achromatic doublet
  - 低分散 (クラウンガラス) の凸レンズ
  - 高分散 (フリントガラス) の凹レンズ
  - 2つの波長を同じ距離に結像できる
    - 例えば赤 / 青
    - 他の波長 (緑など) は補正できない

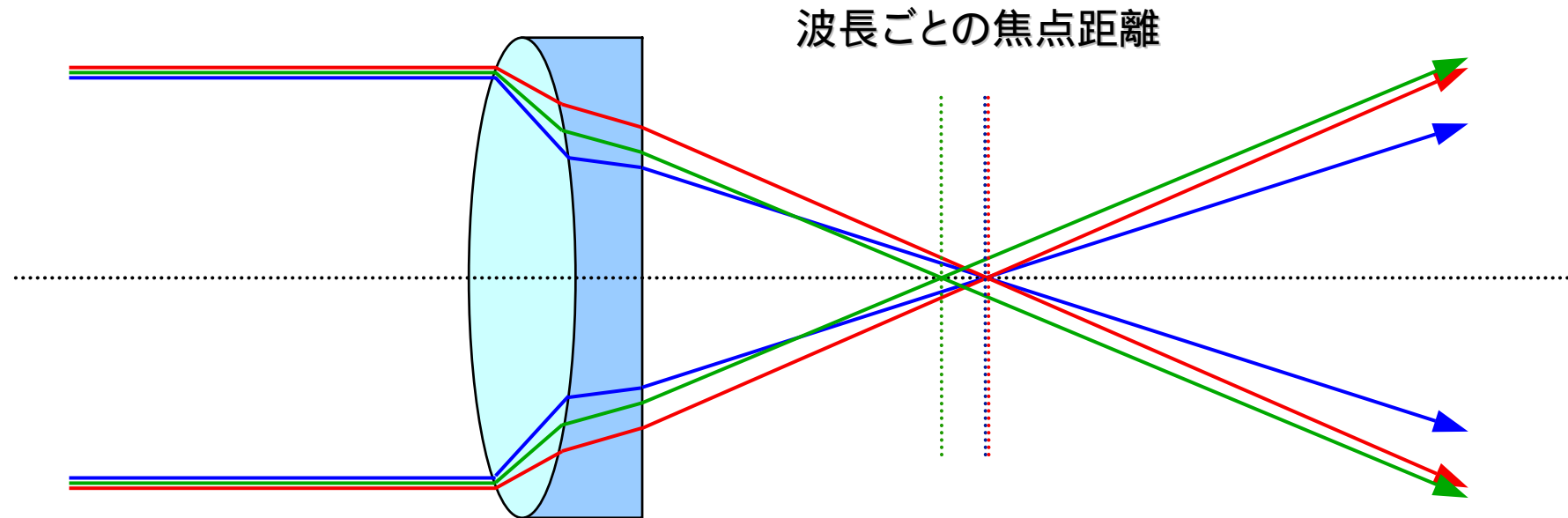
# アポクロマート (Achromat)

- 一般に3つの波長域を補正できる色消しレンズ
  - 例えば赤 / 緑 / 青の波長を同じ距離に結像できる
- Achromatic triplet
  - 3枚レンズの組み合わせ(トリプレット)

# アポクロマート (Achromat)

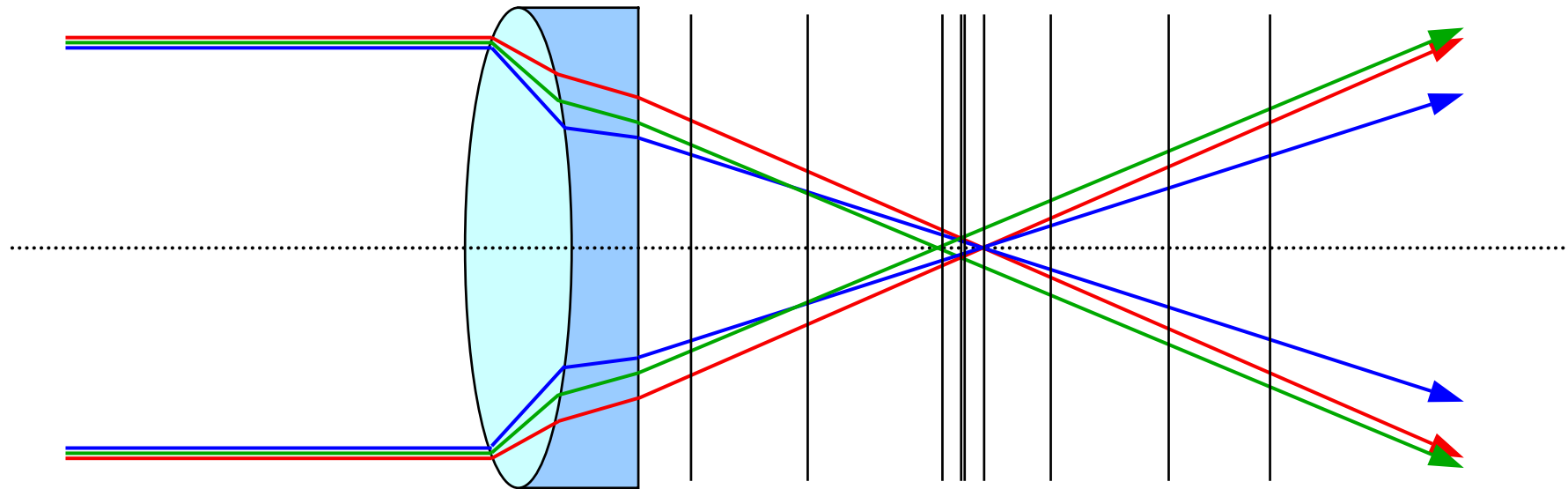
- その他の特殊な色消しレンズ
- 凸レンズに蛍石や異常部分分散 (UD / ED) ガラスを利用
  - 特殊な分散をもつレンズ
    - 分散が少なく、通常のガラスとは異なる分散特性をもつ
  - ダブルレットでもより多くの波長域で補正が可能
  - 蛍石 (フローライト) は特に高度な補正が可能
    - 非常に高価
- 回折レンズ
  - レンズ面に微細な凹凸をもつレンズ
    - 光の回折を利用して逆方向の色収差を発生
    - 通常のレンズと組み合わせて収差を補正
  - DOレンズやPFレンズ

# アクロマートダブルレットによる補正例

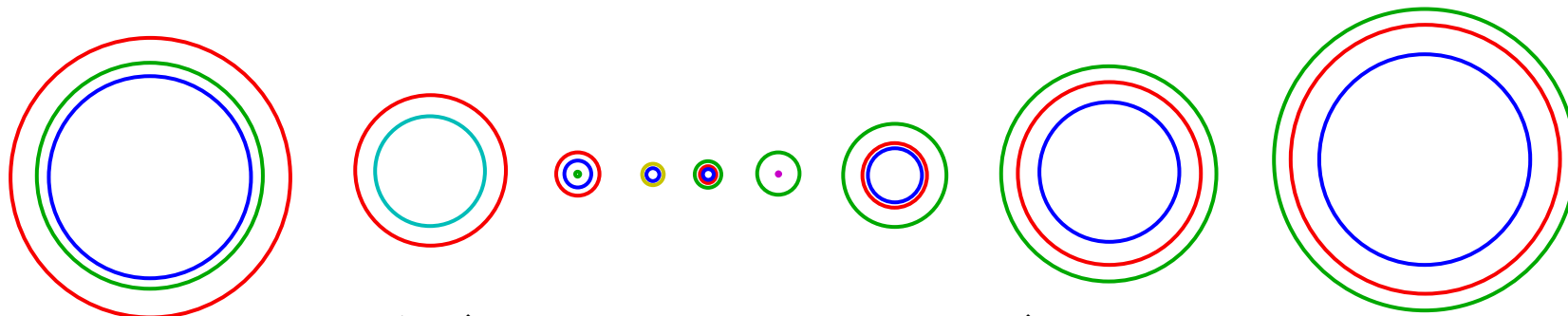


- 赤と青の焦点距離を一致させた場合
  - 緑その他を一致させることはできない
- もし赤と緑を一致させると
  - 青は補正され過ぎて赤と緑の焦点距離からずれる

# アクロマートダブルレットによる補正例



周辺部の光線の収束

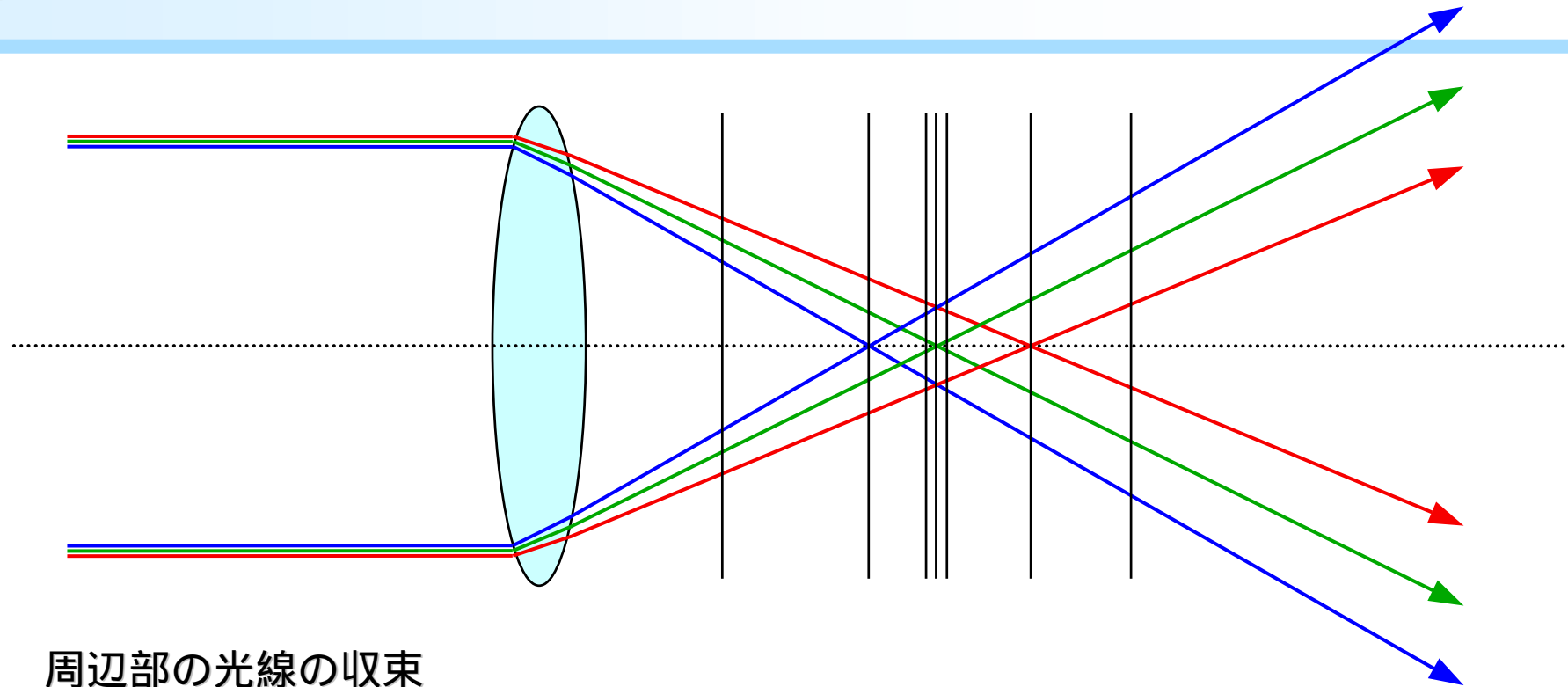


前ボケ

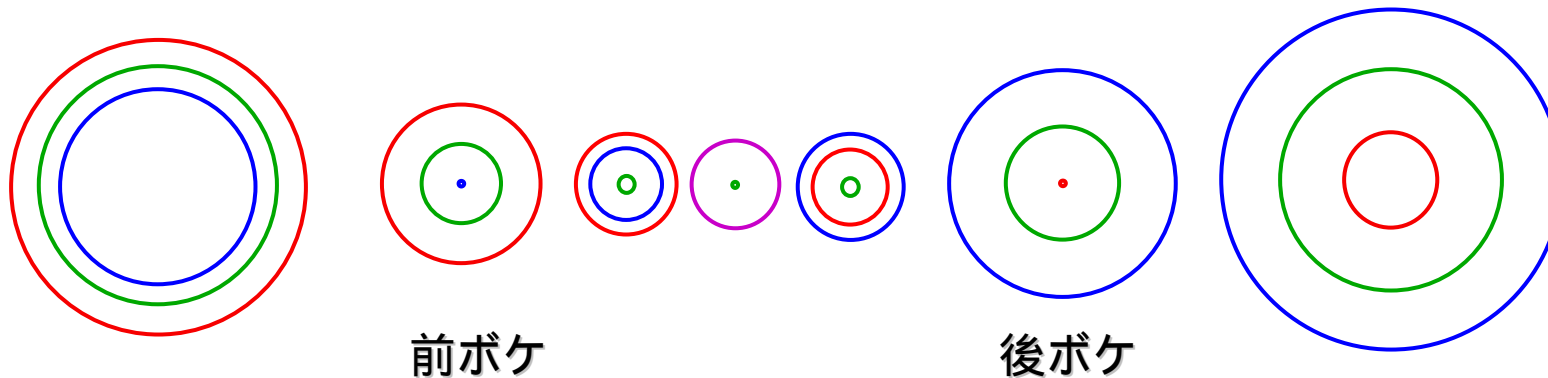
後ボケ



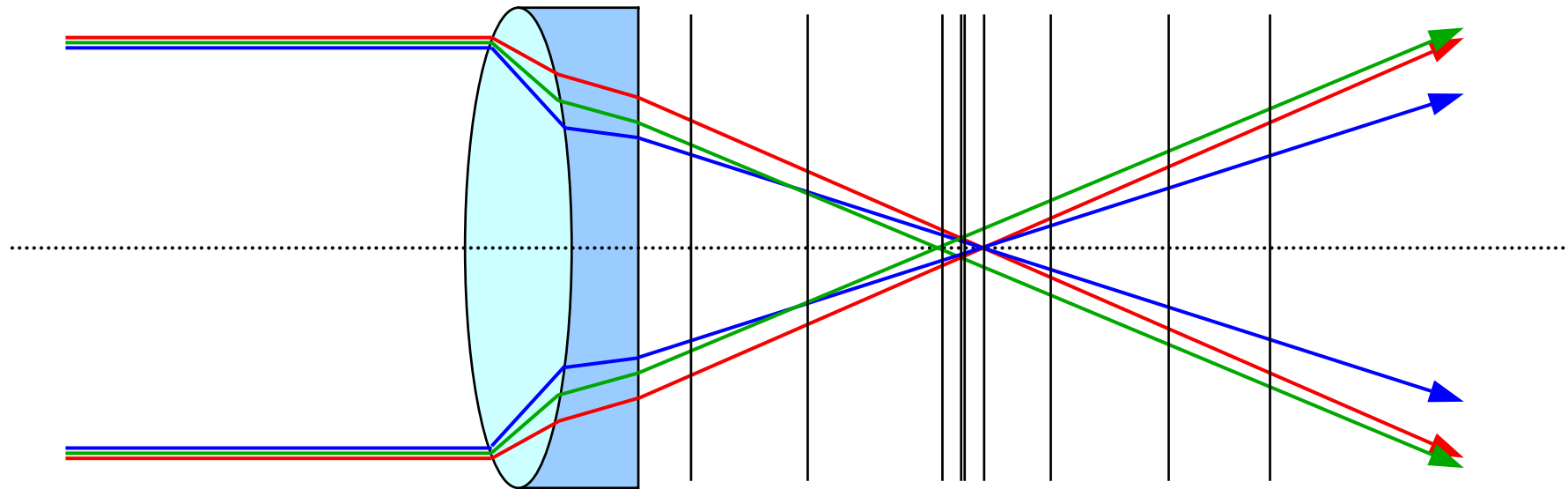
# 補正なし



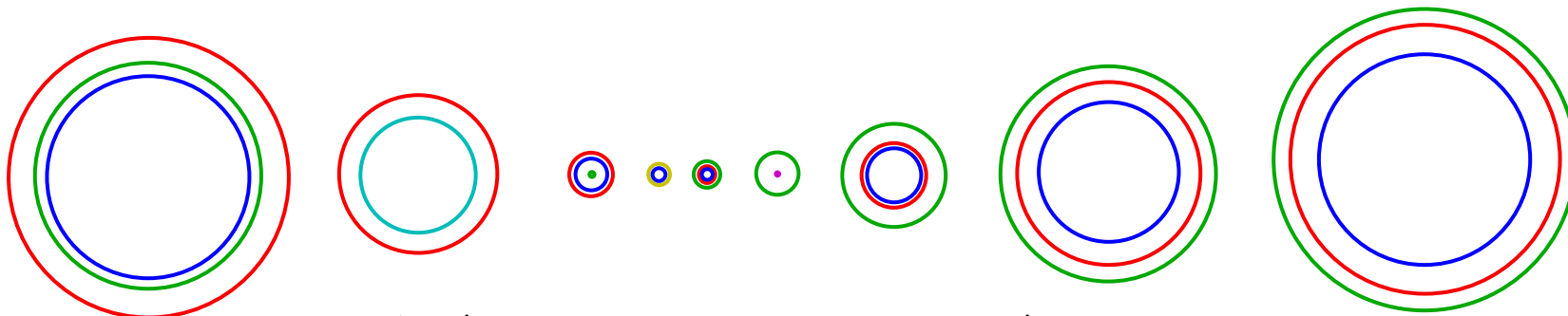
周辺部の光線の収束



# アクロマートダブルレットによる補正例



周辺部の光線の収束

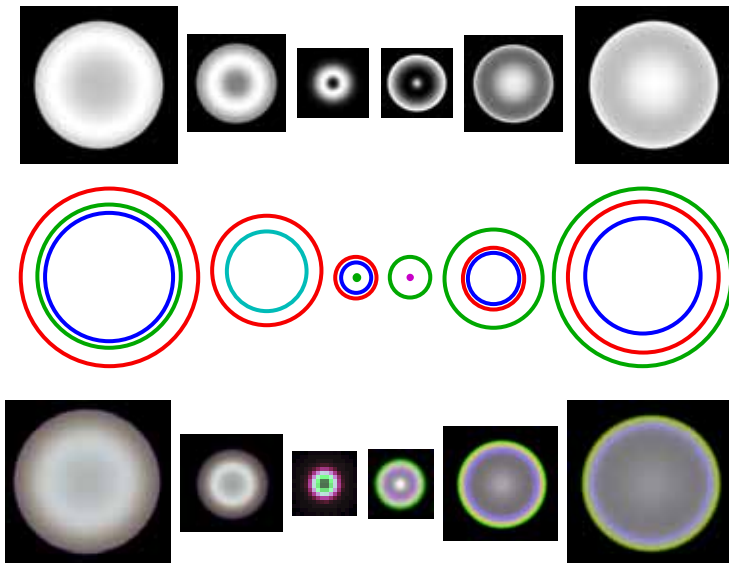


前ボケ

後ボケ

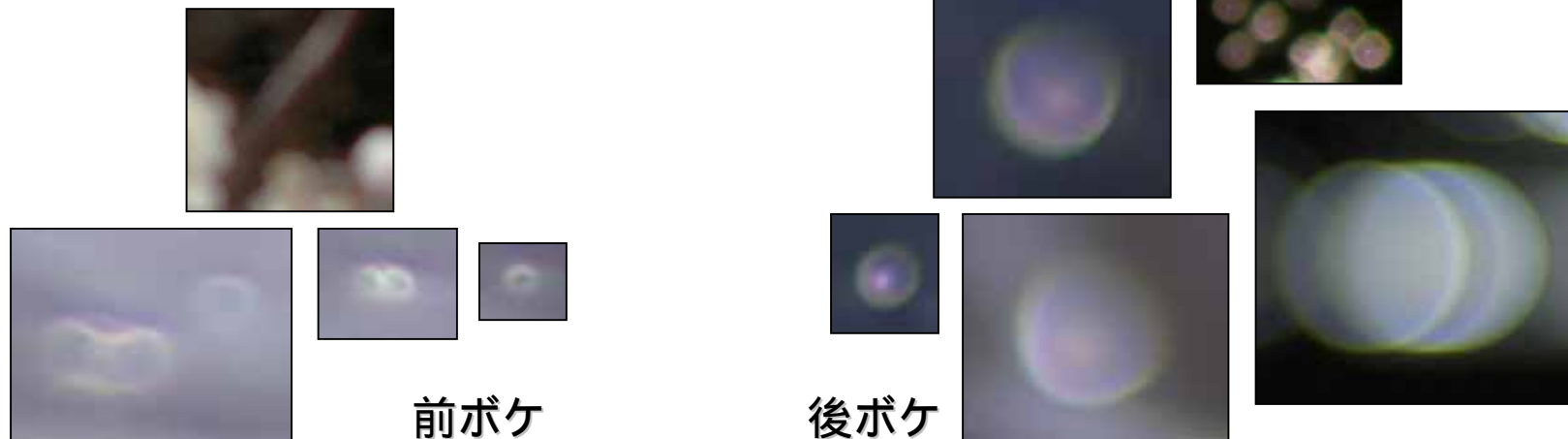
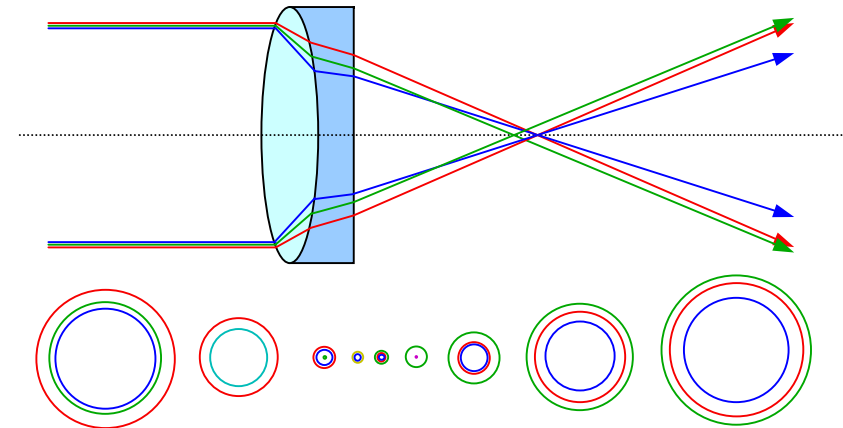
# 色消しレンズによる補正

- 一般に球面収差の補正も同時に行う
- それぞれの特徴が組み合わさったボケ味となる
  - 球面収差の残存収差
    - ソフト/シャープなエッジ
    - 中央の暗部(穴) / 鋭いピーク(芯)
  - 軸上色収差の残存色収差
    - 同心円状の着色
- 着色されたエッジや芯



# 収差が補正されたボケ

- アクロマートによる補正
  - 広く利用されている
  - 典型的な補正
    - 前ボケに赤や紫のソフトな輪郭が出やすい
    - 後ボケに緑や黄のシャープな輪郭が出やすい



# 赤いソフトな輪郭の前ボケ



# 緑のシャープな輪郭の後ボケ

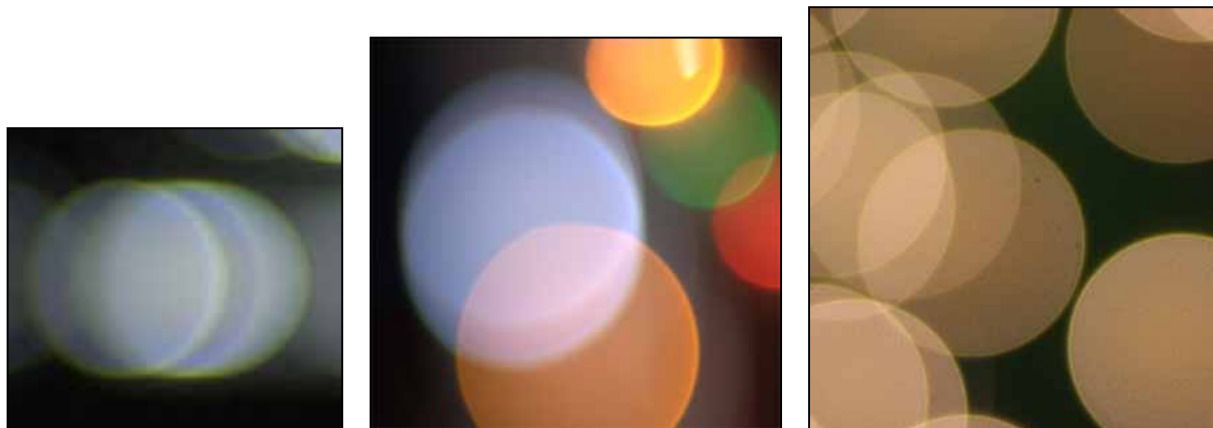


# 収差が補正されたボケ

- 絞りが大きくピンボケが少ないボケ
  - 大きな絞りで微妙にピントの外れたボケ
  - 残収差が目立つ



- フォーカスから遠い(大きな)ピンボケ
  - 大きなピンボケほど残存色収差は軽減される



ムケテ、未来。

CEEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

# コマ収差

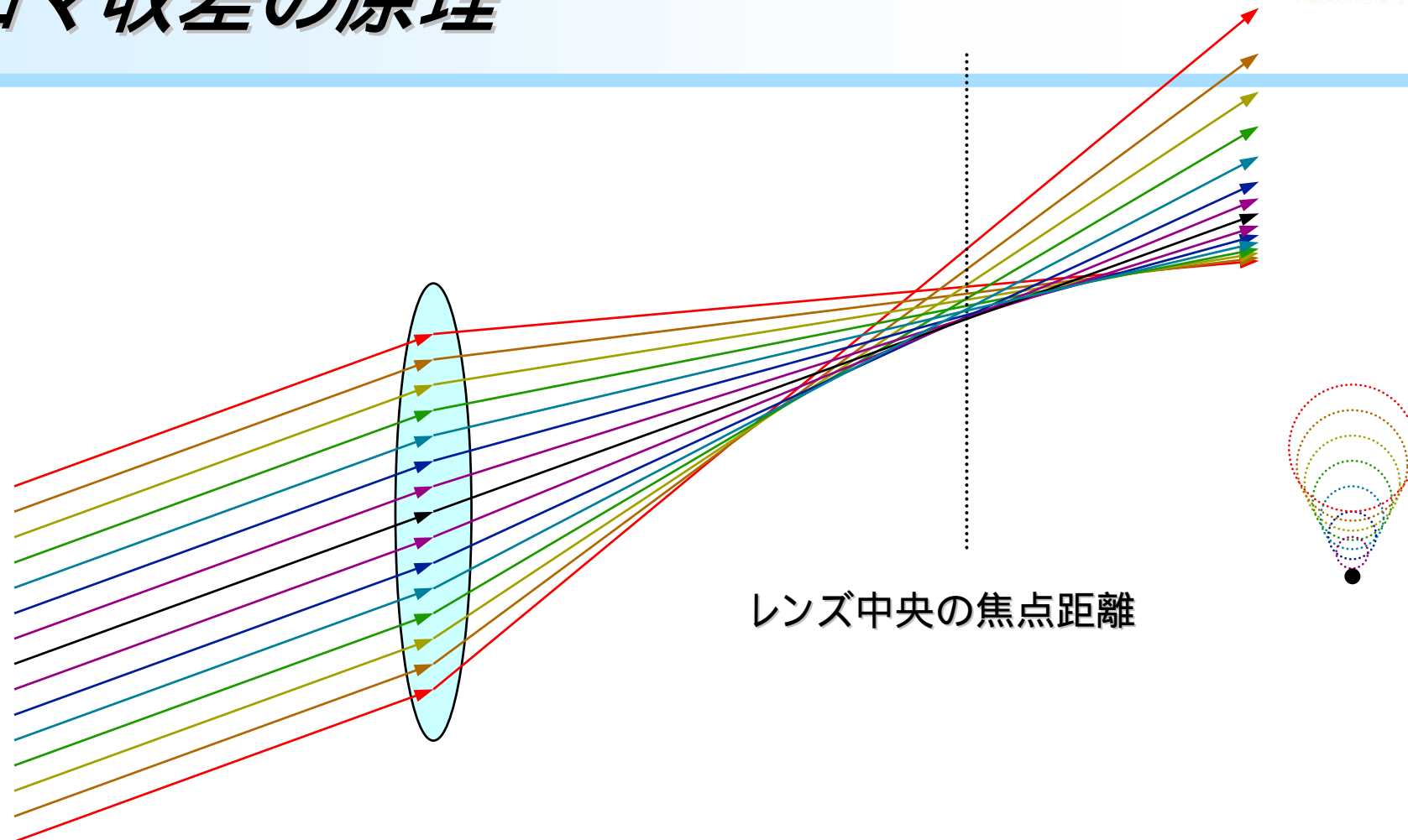
Coma aberration



# コマ収差 (Coma aberration)

- レンズに斜めに入射する光線の収差
  - 主光線(レンズ中央を貫く光線)が斜めに入射する光束
  - 主光線以外の周辺の光線が一点に結像しない
    - レンズ中心を貫く光線以外のずれ
- 球面収差とは似ているが異なる
  - 球面収差はレンズに垂直に入射する光束の収差
  - コマ収差はレンズに斜めに入射する光束の収差
    - 球面収差がゼロでも発生する

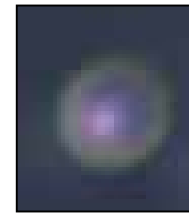
# コマ収差の原理



- 周辺部ほど焦点距離と撮像倍率がずれる

# コマ収差の影響

- 画像中心以外が彗星のように尾をひく
  - 画面周辺または中央に向かう尾
  - 完全にはフォーカスしない
- ボケが流れる
  - 形が歪になる
  - 流れた側が薄く見えにくくなる
    - 片側だけのエッジが目立つようなボケ



ムケテ、未来。

CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

# ボケカーネルの生成

ボケを表現するための  
テクスチャを生成する

# テクスチャとしての設計

- リアルタイムには変化しない要素
  - レンズ(光学系)の構成
    - ダブルレット/トリプレット/非球面レンズなど
  - 構成ごとに独立した専用のテクスチャとする
- レンズの条件による変化
  - 絞り/結像距離などの違いならおおよそ似た傾向
  - 代表的なパラメーターつで近似
    - マッピング時に動的にスケールを入れる
- フォーカス前後での変化
  - フォーカスからの距離で連続的に変化
    - 見た目の特徴に大きな変化があるため表現したい
  - レンズからの距離方向に次元使用

# テクスチャとしての設計

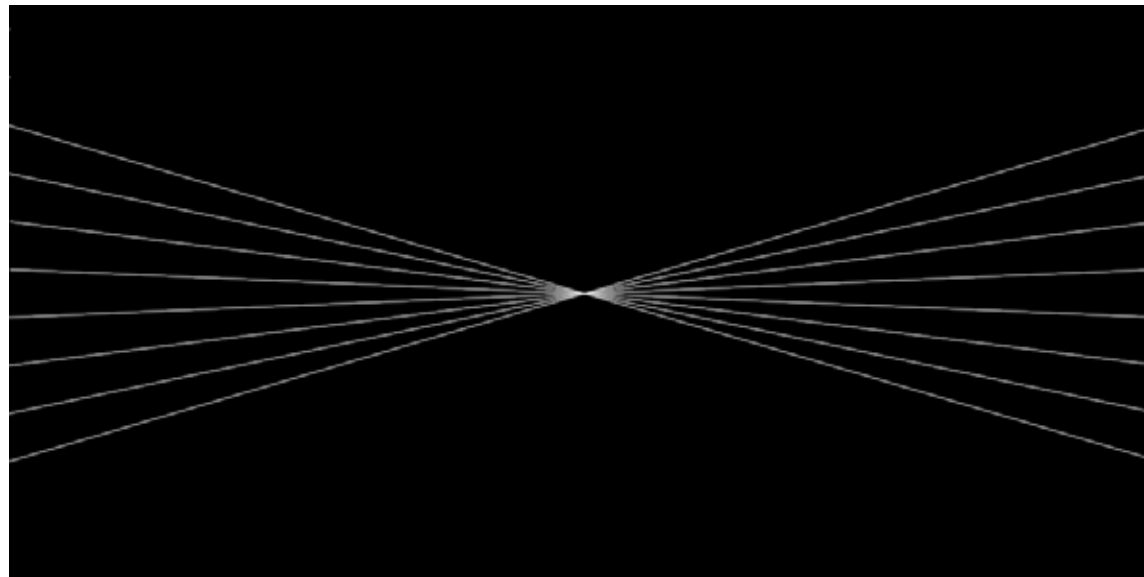
- ボケ形状は一般に二次元の情報
  - 二次元フィルタのカーネル
- レンズからの距離方向と合わせると三次元必要
  - 金太郎飴のようなボリュームテクスチャ
  - できれば二次元テクスチャに抑えたい
  - つまりはボケカーネルを一次元に抑えたい
- 等方的なカーネルなら一次元で良い
  - 円形絞り(同心円状のボケ)
  - ボケの中心からの距離だけで決まる
- まずは円形絞りに限定

# テクスチャとしての設計

- 二次元テクスチャ
  - レンズからの距離方向をu座標
  - 光線の入射高(光軸からの距離)をv座標
- コマ収差はテクスチャには含めない
  - パラメタが多い
    - テクスチャにすべて格納するには不向き
  - ボケのマッピング時に動的に対応
    - マッピング座標をずらす

# テクスチャの生成

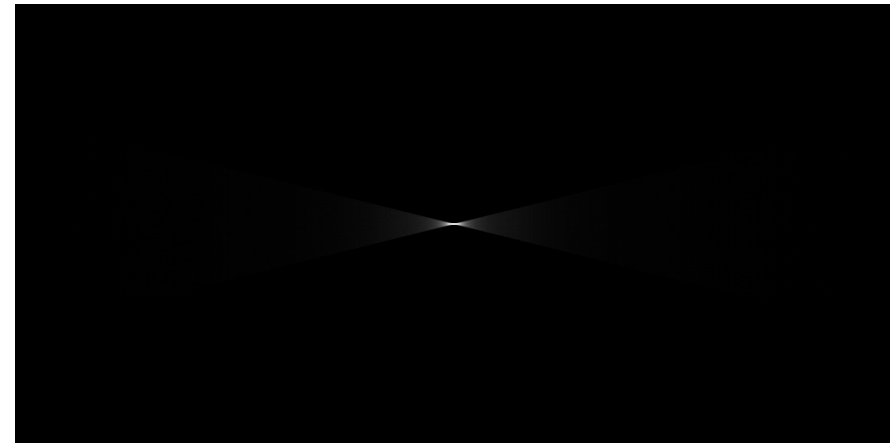
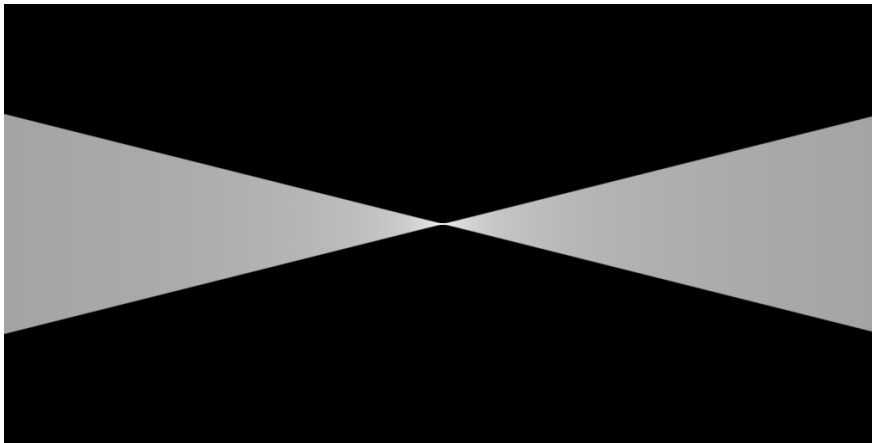
- レンズからのレイキャスト
  - 屈折した光線を飛ばす
- レンズからの光線の軌跡(光路)を格納
  - これをあらゆる入射高について積分する
    - 実装では多数の光線を飛ばして加算する
  - 結像位置(フォーカス)付近には光が集まる





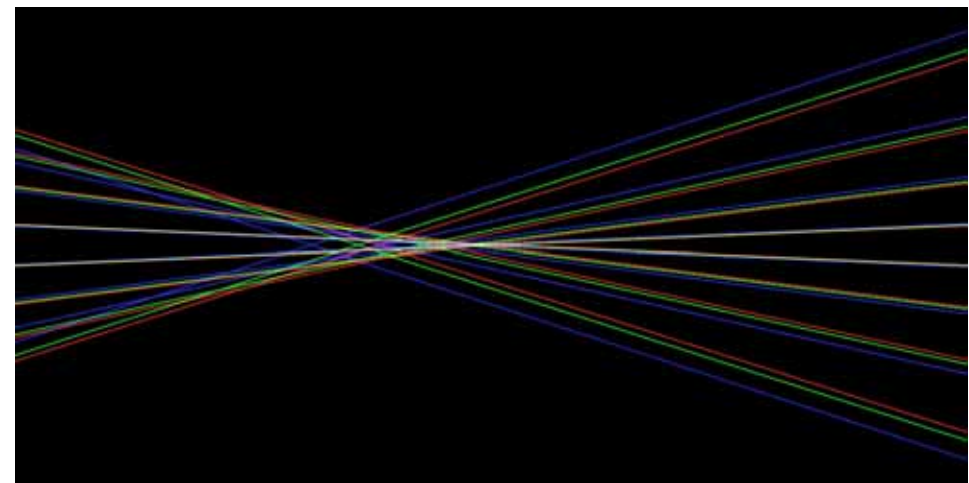
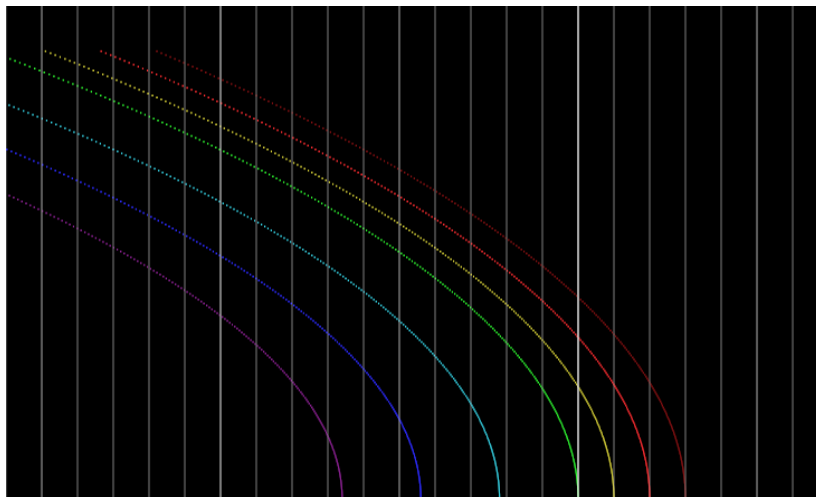
# 生成されたテクスチャ(収差なし)

- 生成したテクスチャ
  - 実際のテクスチャは上下片側だけ
  - 横方向のサイズはもっと圧縮する
- ボケの明るさは面積に反比例する
  - 実際の光線は環状に二次元に広がるため積分結果を2乗する
  - フォーカス部分以外はほとんど黒に近くなる(右図)
- 左図は見やすさのため結像位置から離れた部分を明るく表示している
  - 縦一列ごとの最大の輝度を元にスケール



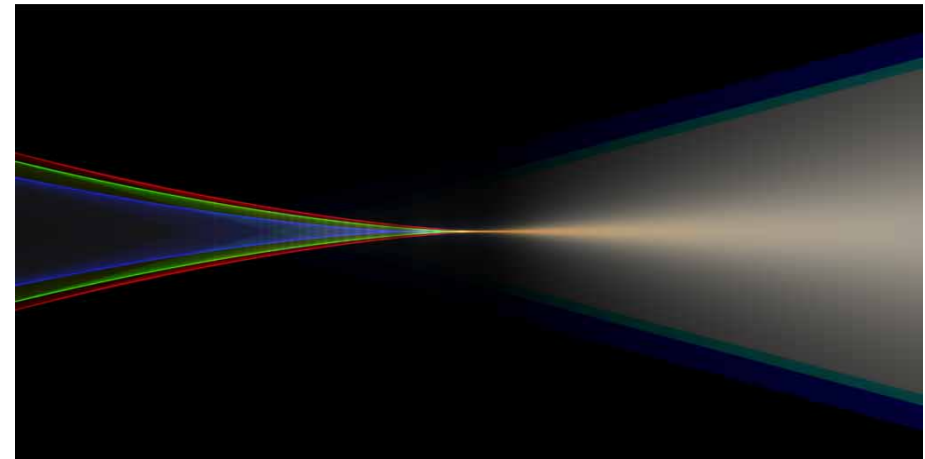
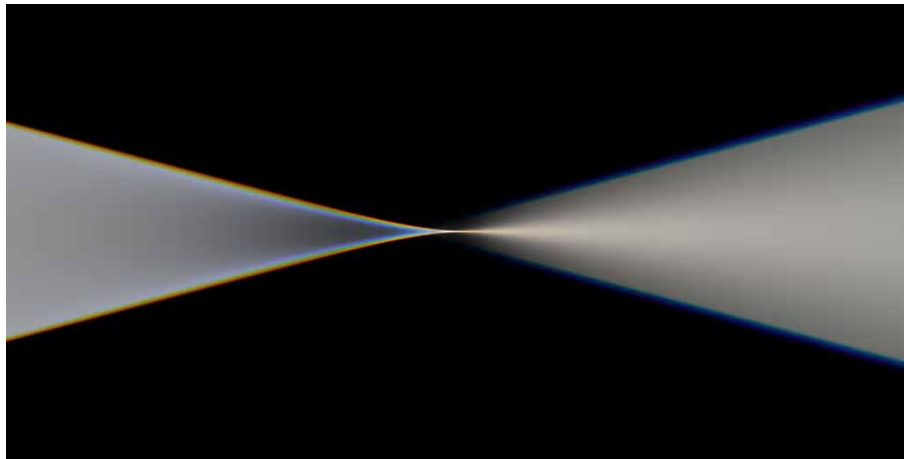
# 収差の反映

- 球面収差と軸上色収差を考慮
  - 色収差のために波長ごとにレイキャスト
- 収差情報はR G B個別に用意
  - 球面収差曲線は入射高と収束距離の関係を示す
  - レンズの屈折位置(後側主面)と結像点を結ぶ直線が光線の軌跡



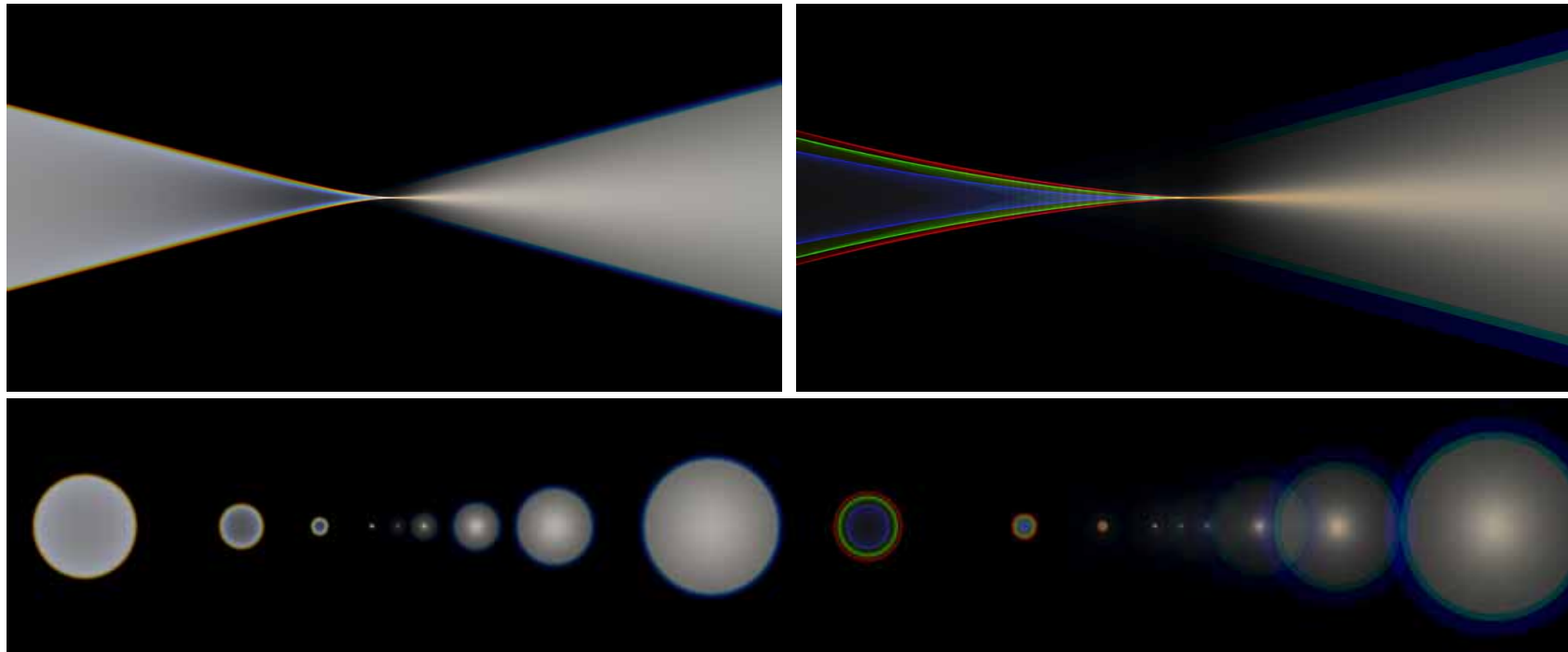
# 生成されたテクスチャ

- 右側はフォーカス付近を拡大したもの
- 明るさは縦一列の最大輝度を元にスケール済み



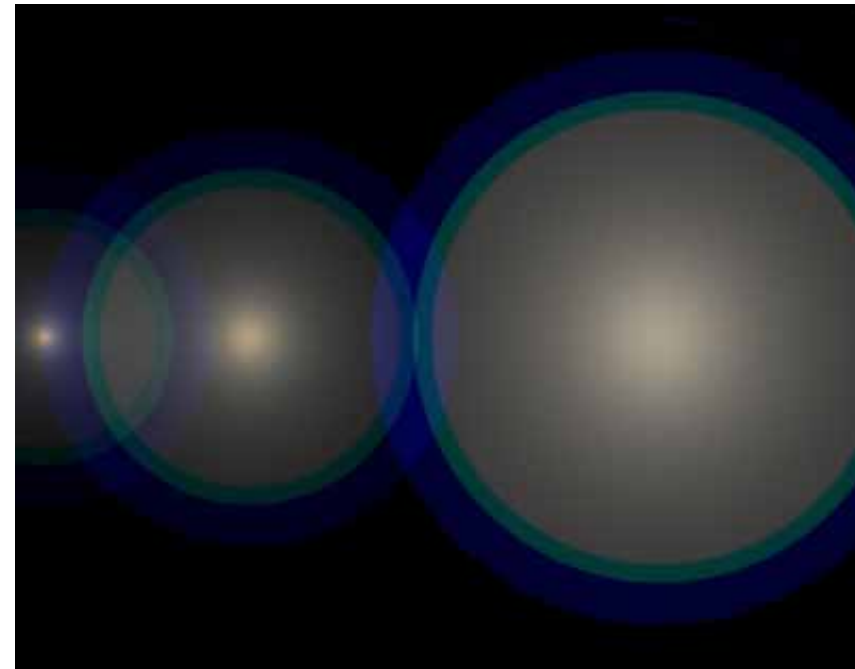
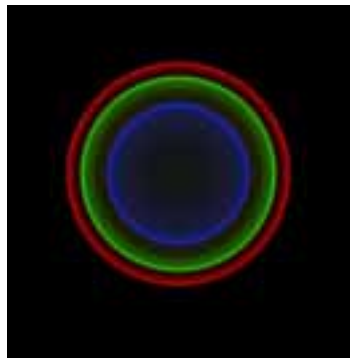
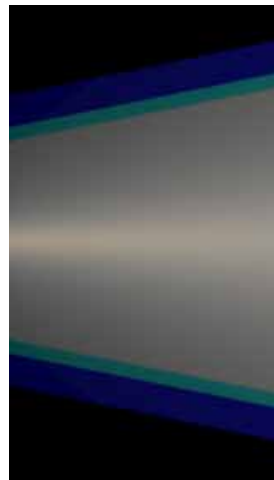
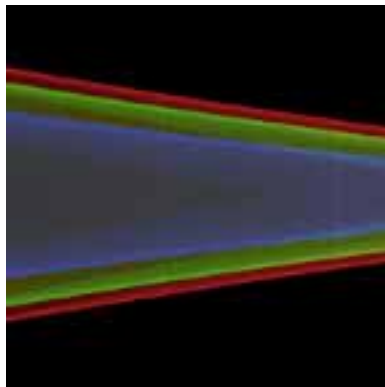
# テクスチャのマッピング

- 縦一列がレンズから等距離の光束の分布を表す
  - 縦一列を切り出して環状にマッピング
  - これが実際のボケの画像となる



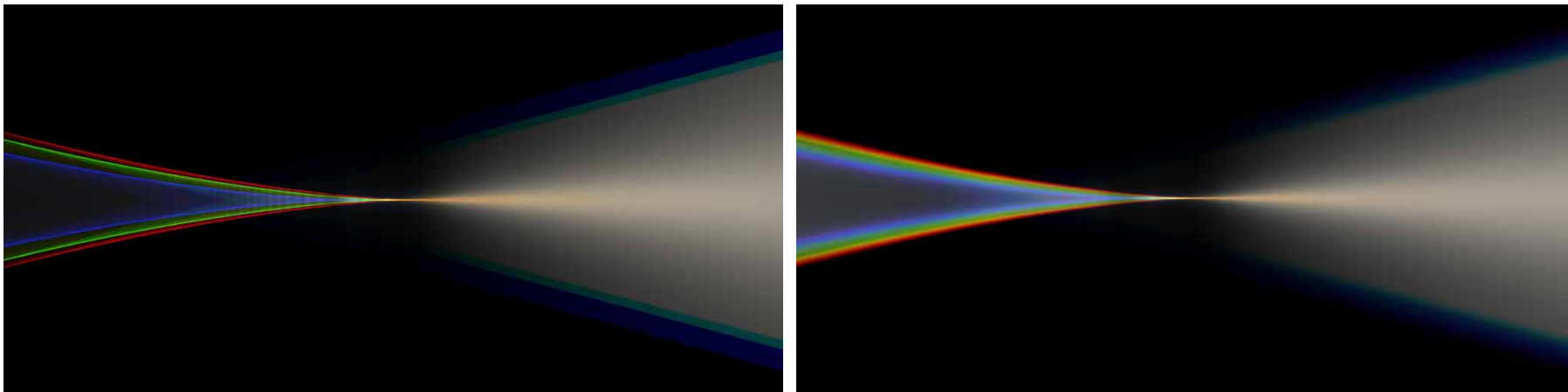
# 画像が離散的になる

- 色収差が原因
  - RGBの三色スペクトルでは分散を十分に表現できない

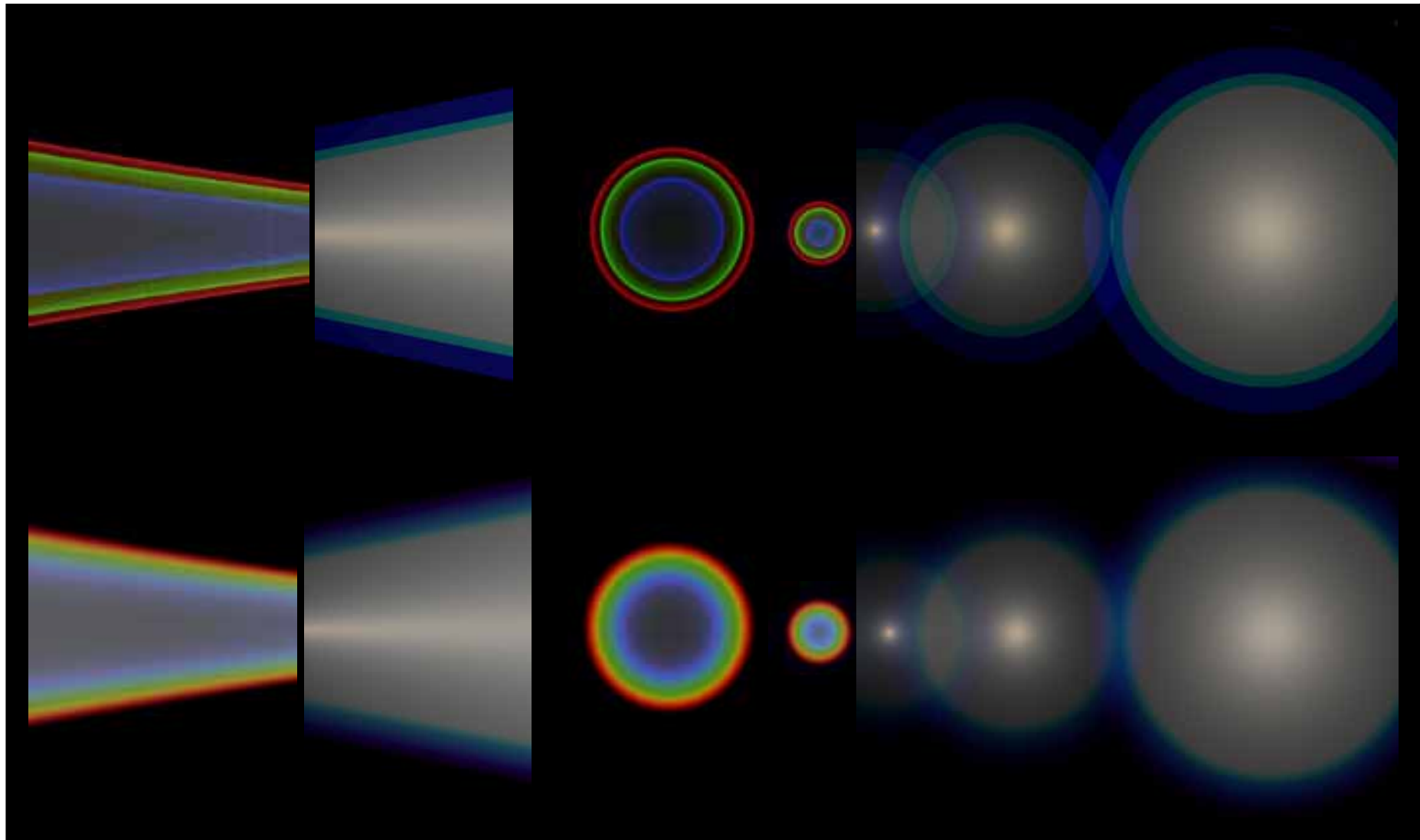


# スペクトルをもっと細かく適用

- 数十種類の波長に分離
  - 収差の程度とテクスチャ上の分解能による
  - 収差パラメタはとりあえずRGBから線形補間
    - 本来は波長で滑らかに変化するパラメタを用意すべき
- 最後にRGB値に変換
  - 各波長のRGBセンサへの寄与に従ってRGB値へ変換

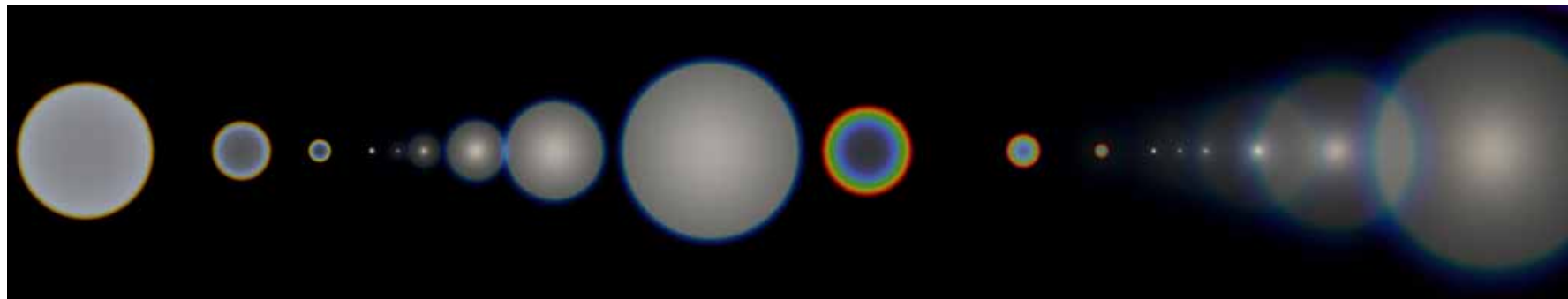


# スペクトルを細かく適用して生成



# 収差によるボケ味の再現

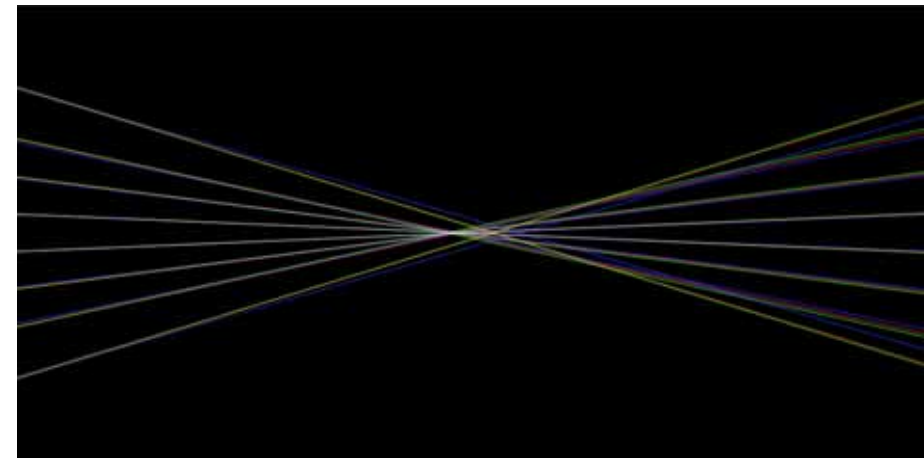
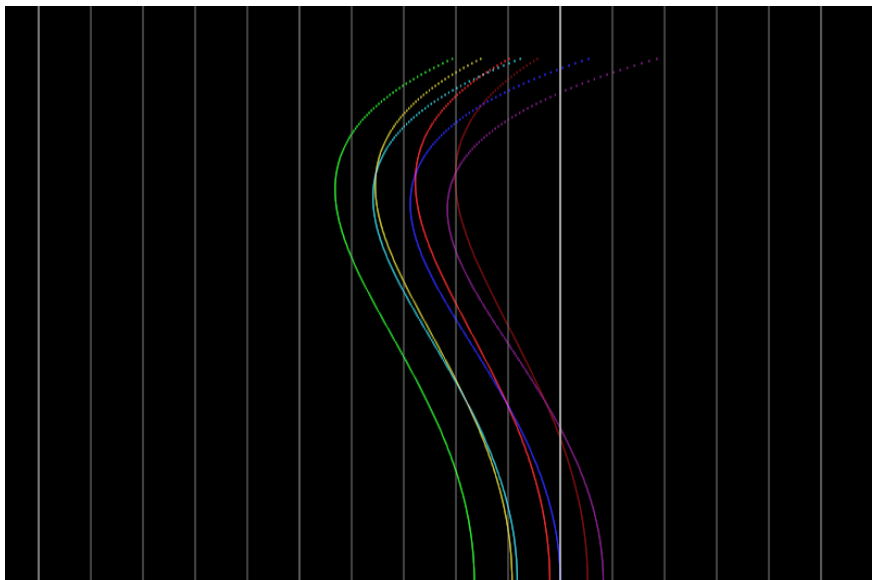
- 球面 / 色収差によるボケの特徴の再現
  - ソフトフォーカス
    - 完全にはフォーカスしない
  - 赤いシャープなエッジをもつ前ボケ
  - 青～紫のソフトなエッジをもつ後ボケ
- 右側はフォーカス付近の拡大





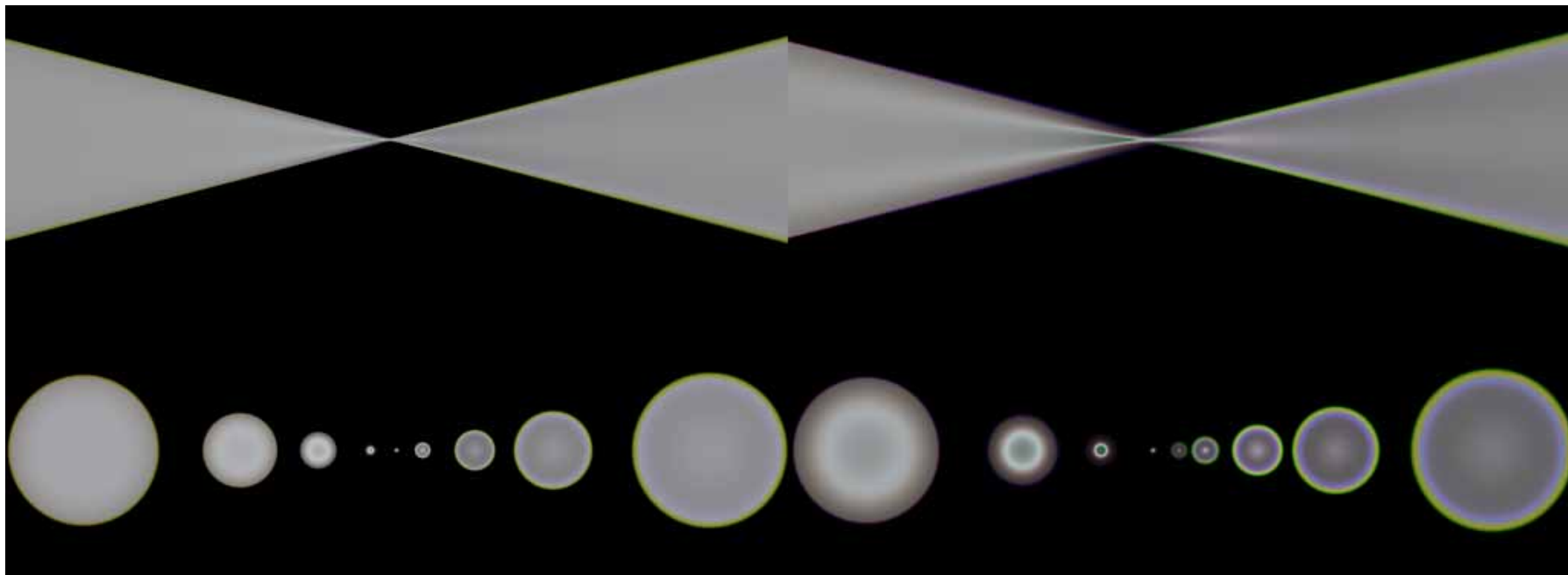
# ダブルレットレンズのテクスチャ生成

- 適当に作った収差曲線を使用
- 目的のレンズのデータがあればそれを利用する
  - 波長ごとの屈折後の光路が判れば生成可能



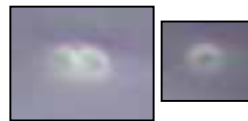
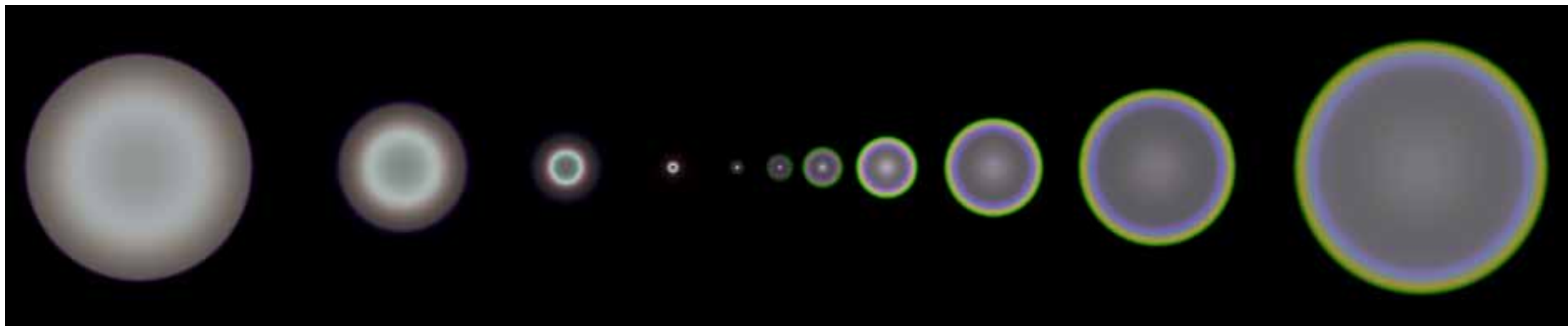
# ダブルレットレンズのボケテクスチャ

- 右側はフォーカス付近の拡大

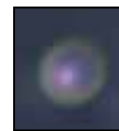


# ダブルレット補正によるボケ味の再現

- よく見られるタイプの補正レンズ
  - 前ボケに赤～紫のソフトなエッジと中央部の減衰
  - 後ボケに緑～黄のシャープなエッジと芯



前ボケ

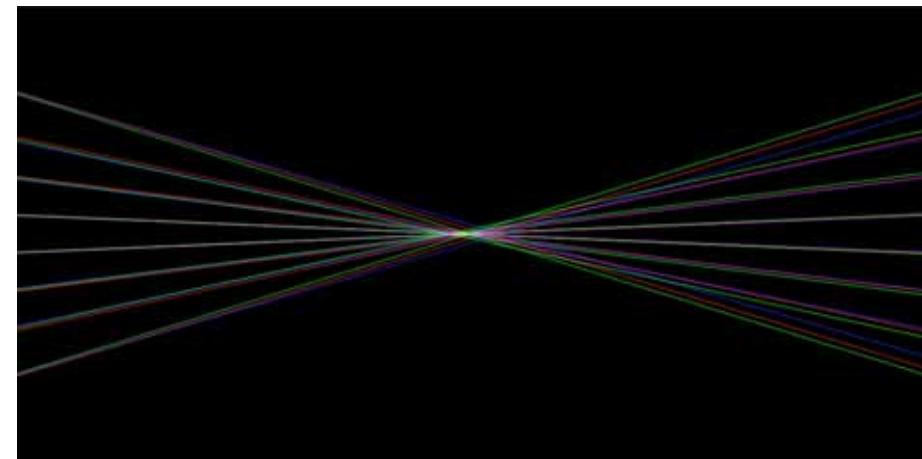
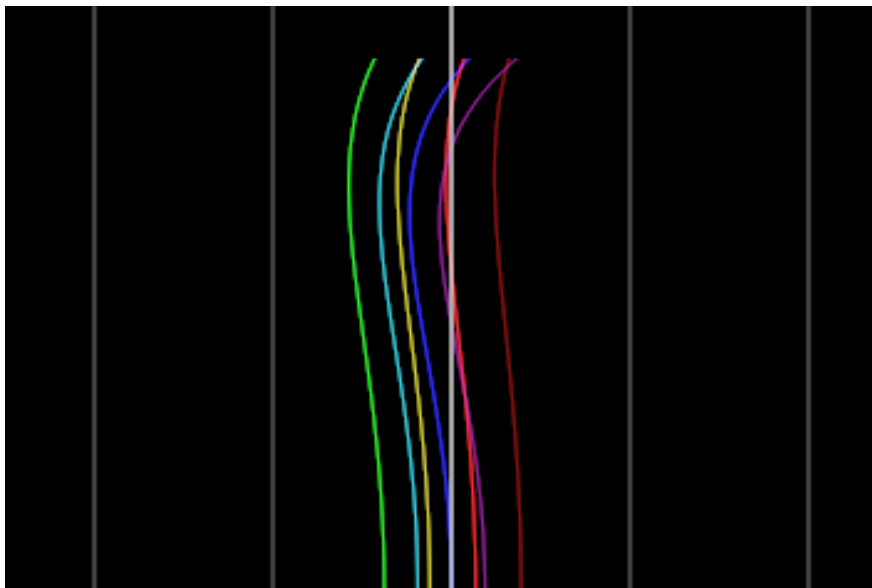


後ボケ



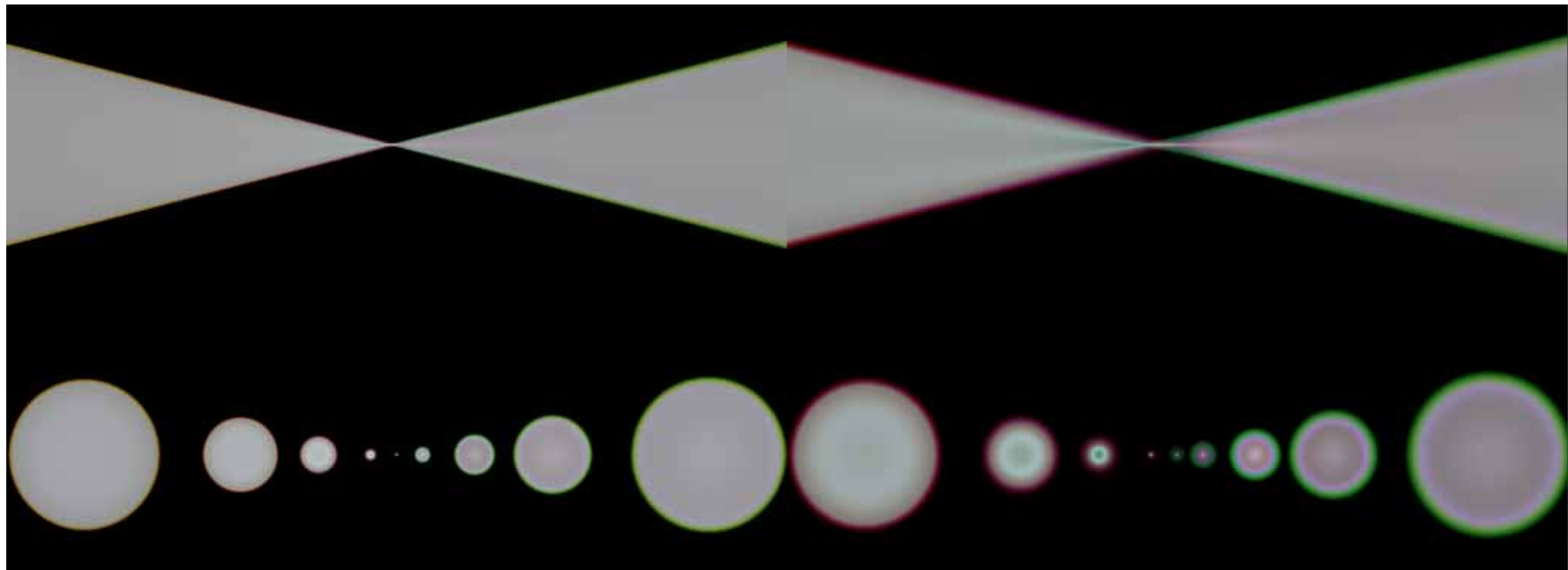
# ダブルレットによる補正(1/3インチCCD)

- コンパクトデジカメなどの小型CCDカメラ用レンズ
  - グラフは縮尺が異なる(35mmフィルムの1/6程度)
  - 球面収差に比べ色収差の割合を大きくした
    - これはあくまで私的な経験則による判断



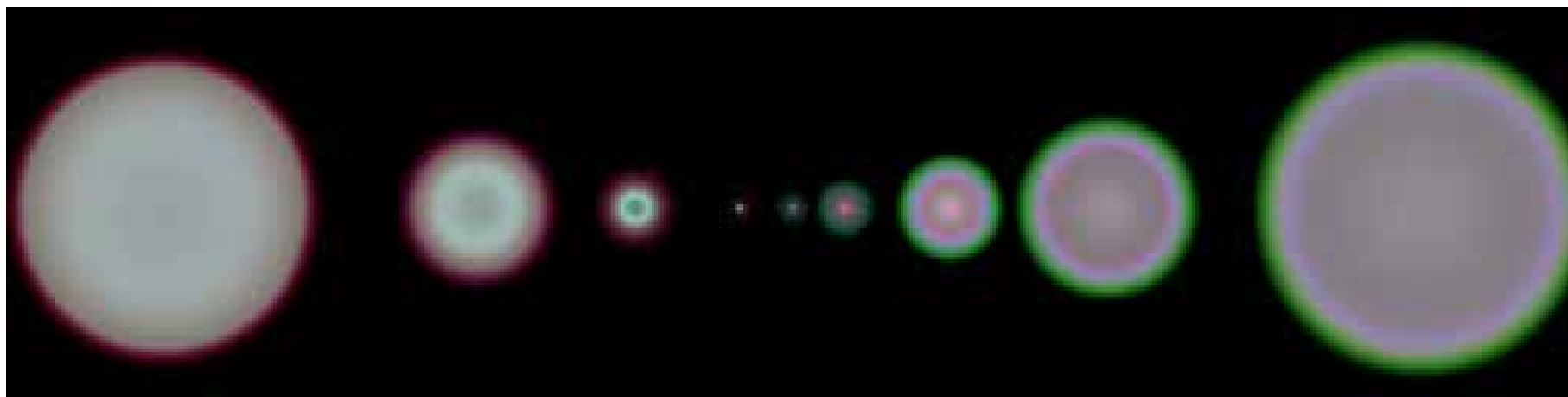
# ダブルレットによる補正(1/3インチCCD)

- 色収差によるエッジ部の着色がやや強い
  - 前ボケに赤～紫のソフトなエッジと中央部の減衰
  - 後ボケに緑～黄のシャープなエッジと芯



# ダブルレットによる補正(1/3インチCCD)

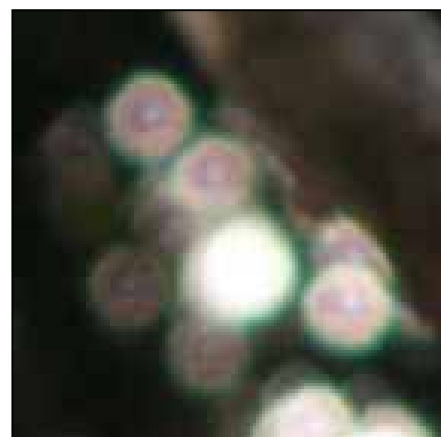
- コンパクトデジカメの写真との比較



前ボケ

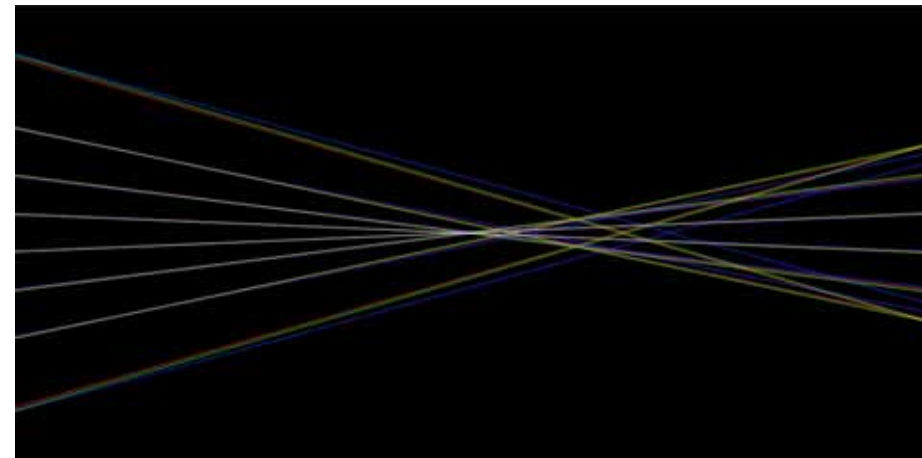
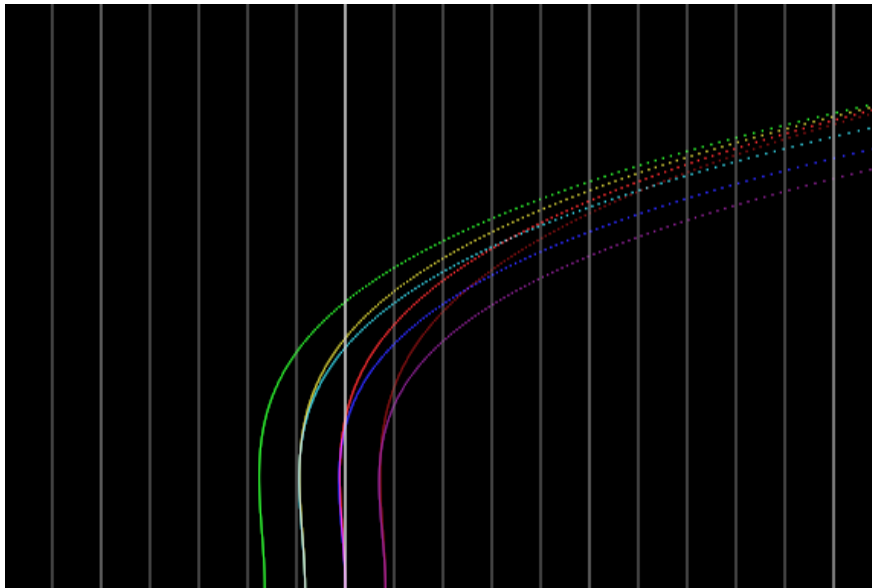


後ボケ



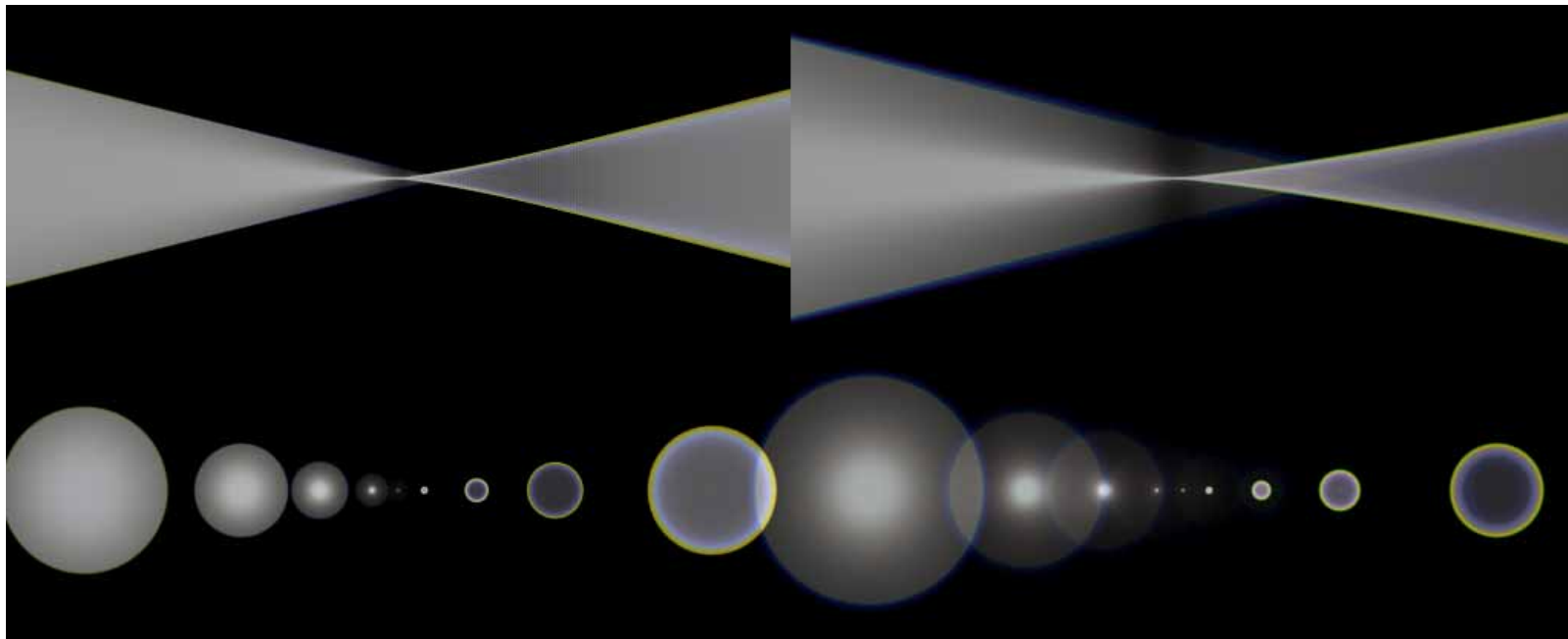
# ダブルレットによる過剰補正ソフトフォーカス

- ダブルレットによる補正を過剰にかけたレンズ
  - ソフトフォーカスレンズとして利用されることがある
  - 収差曲線は適当に作ったもの



# ダブルレットによる過剰補正ソフトフォーカス

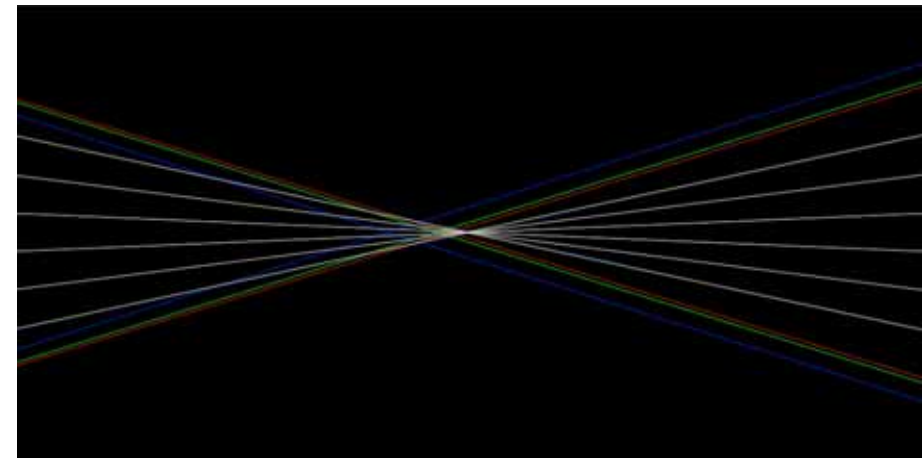
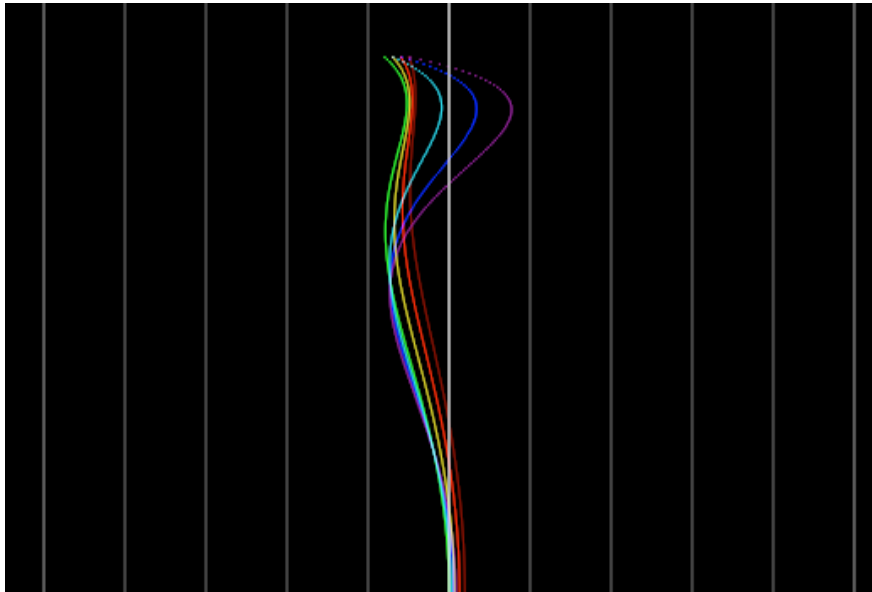
- 補正なしのレンズとおおよそ逆の性質
  - ソフトフォーカス
  - 前ボケにソフトなエッジ
  - 後ボケにシャープなエッジ





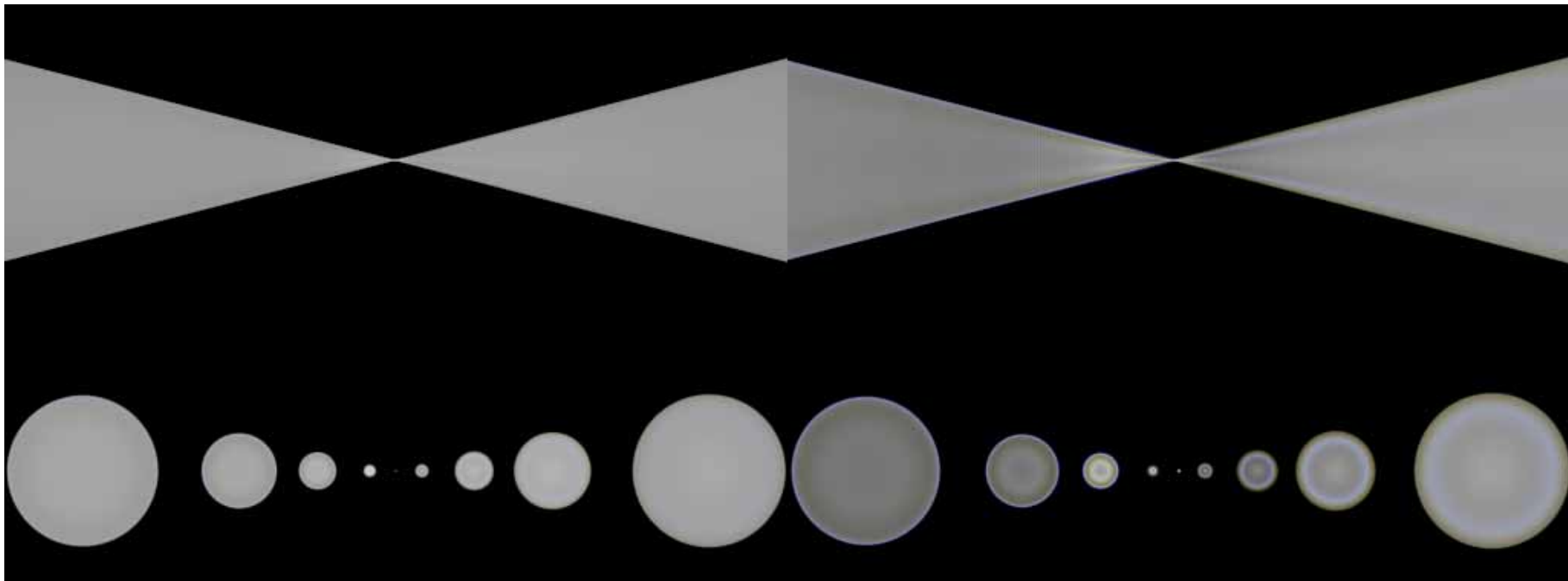
# トリプレットレンズ

- 収差曲線は適当に作ったもの
  - RGBからの線形補間では再現は難しい
  - 球面収差の傾向は再現できる



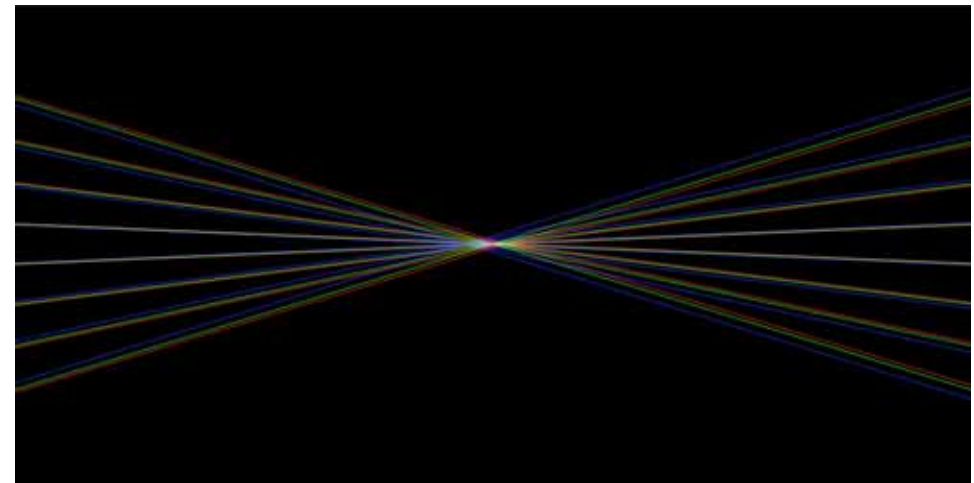
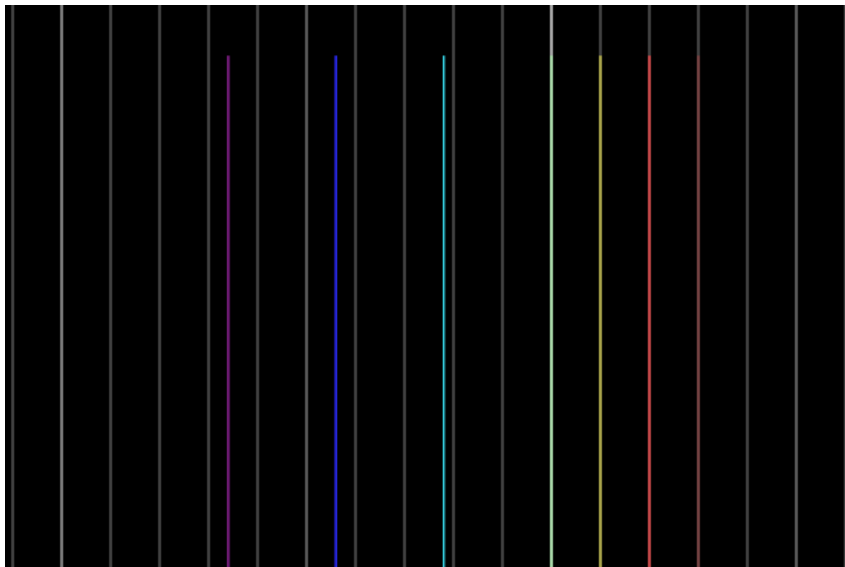
# トリプレット補正によるボケ味

- かなりフラットに近いやや複雑なボケ味となる
  - ダブルット補正にさらに逆性質のエッジが加わる



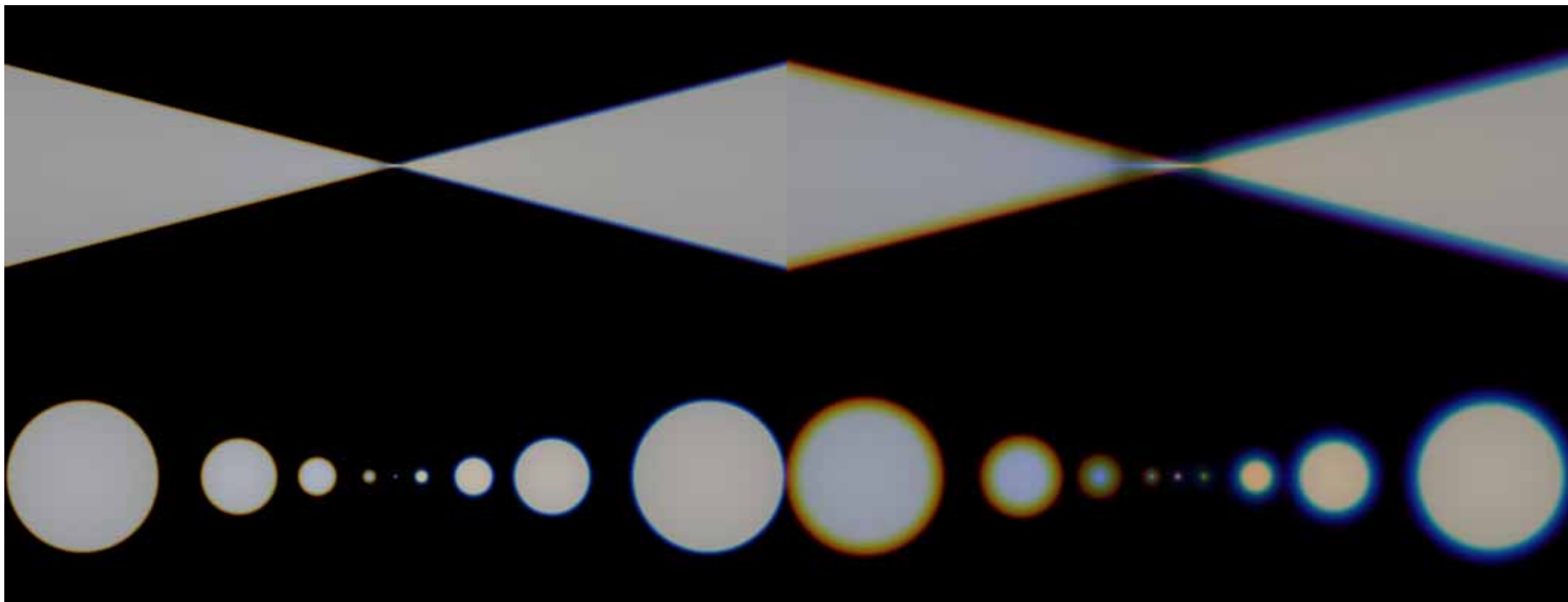
# 非球面レンズ(色収差補正なしの単レンズ)

- 球面収差なし
  - 波長単位では完全にフォーカスする
- 色収差の補正なし
  - 色収差はそのまま残っている場合



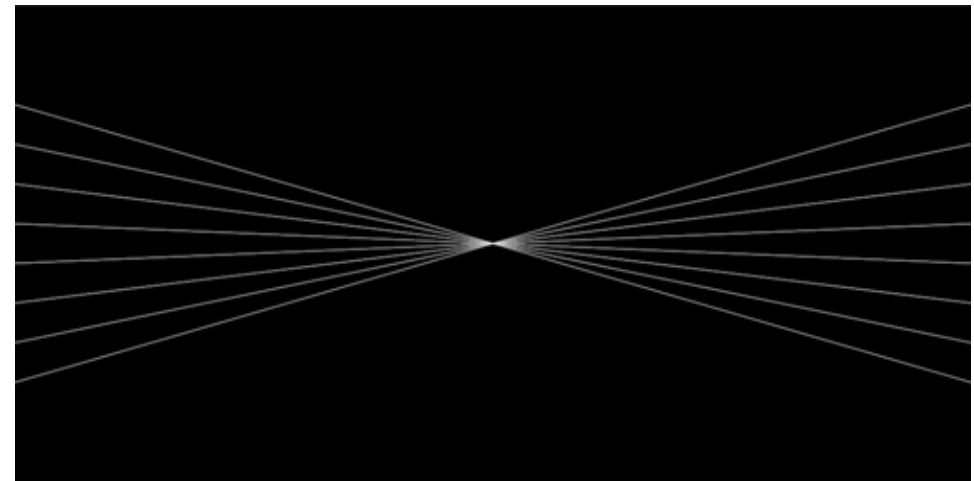
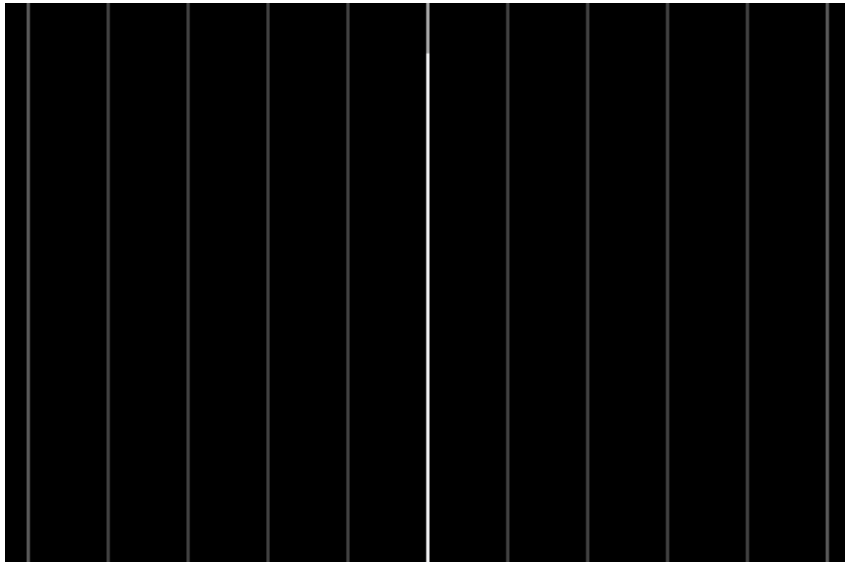
# 非球面レンズ(色収差補正なし)のボケ味

- 色収差補正なしの非球面レンズのボケ味
  - 前ボケに赤いエッジ
  - 後ぼけに青いエッジ
- 球面収差がないためエッジの着色部分以外はフラットなボケ



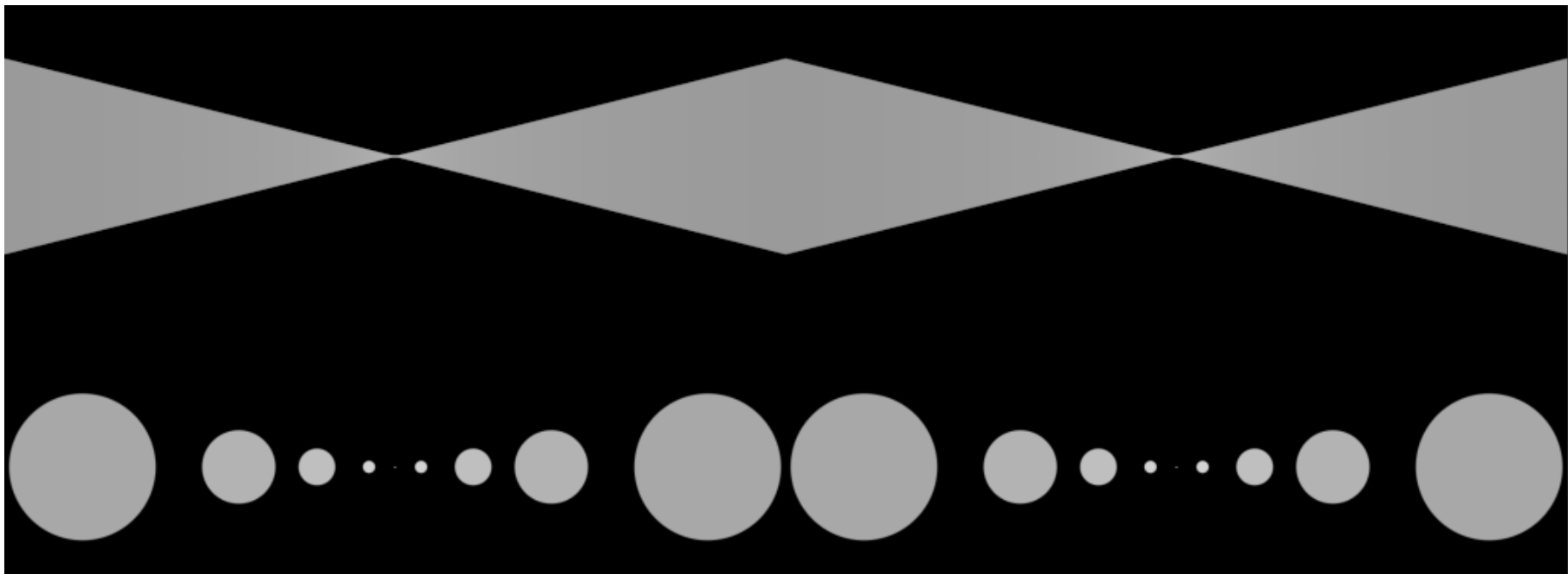
# 収差なしのレンズ(現実には存在しない)

- 球面収差 / 色収差なし
  - すべての波長において完全にフォーカスする



# 収差なしのレンズ(現実には存在しない)

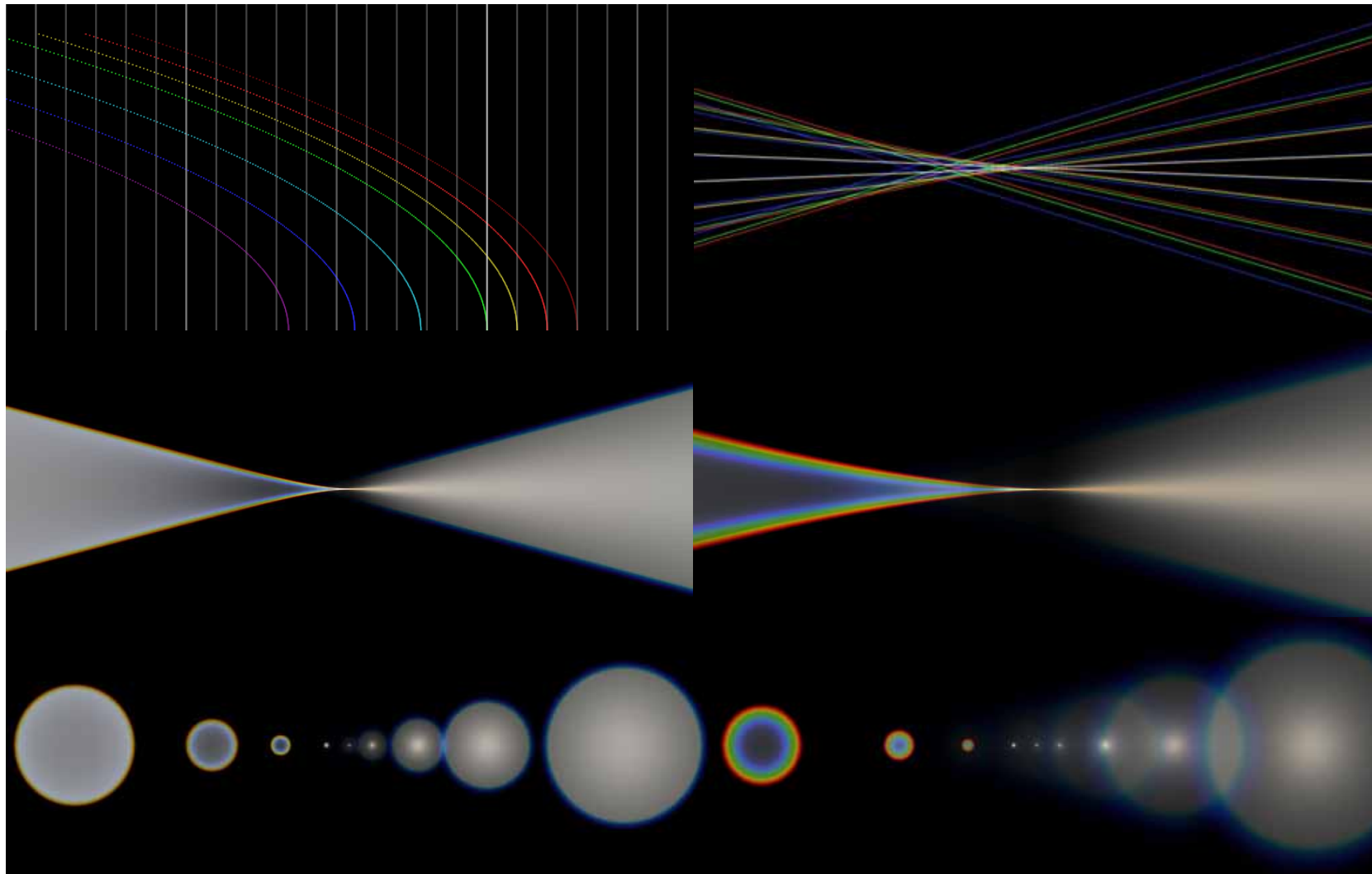
- 完全なフォーカス
- 完全にフラットなボケ



# まとめて比較

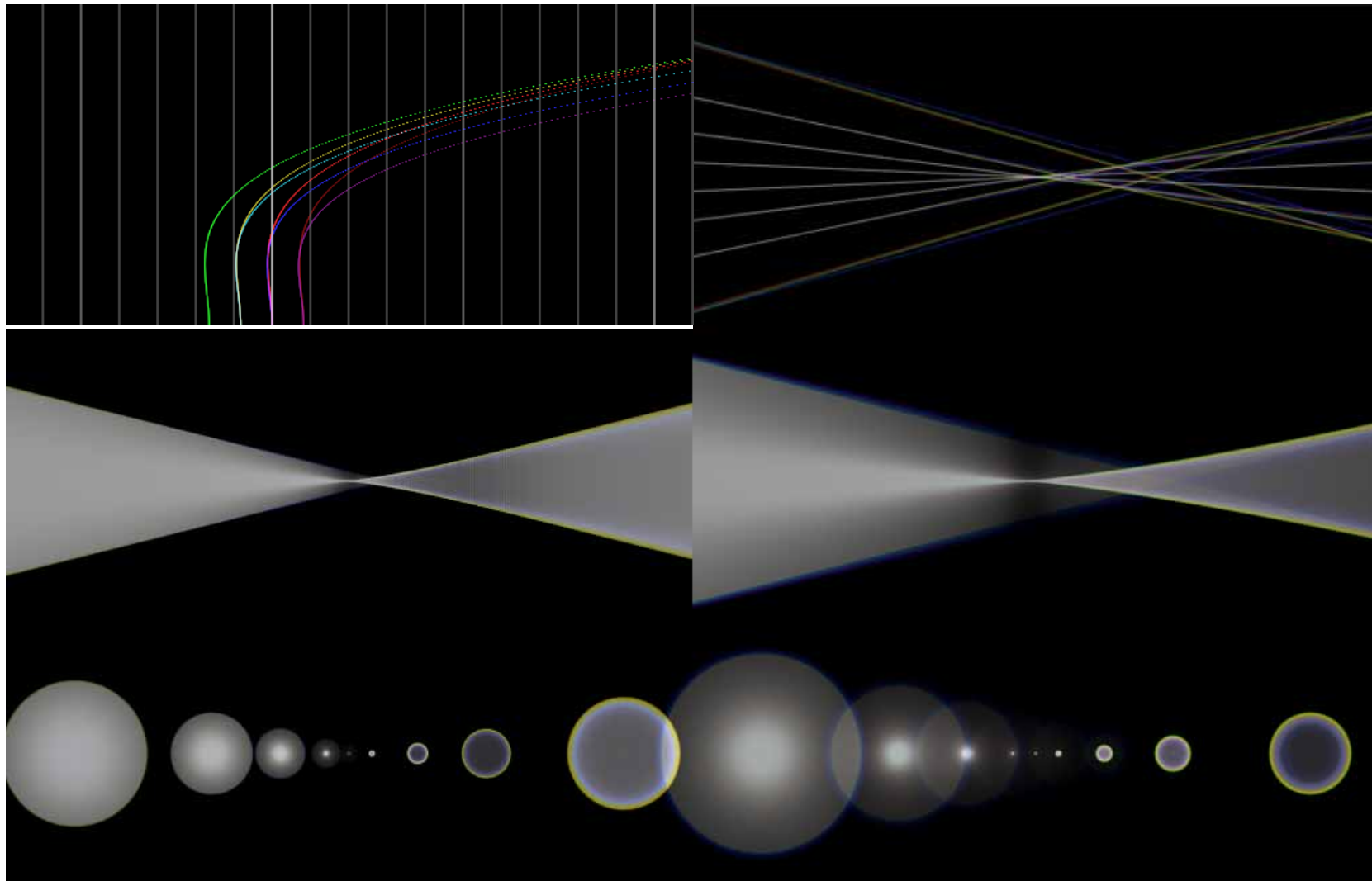
- 収差曲線
- 光線グラフ
- 生成したボケテクスチャ
- ボケ画像

# 収差補正なし

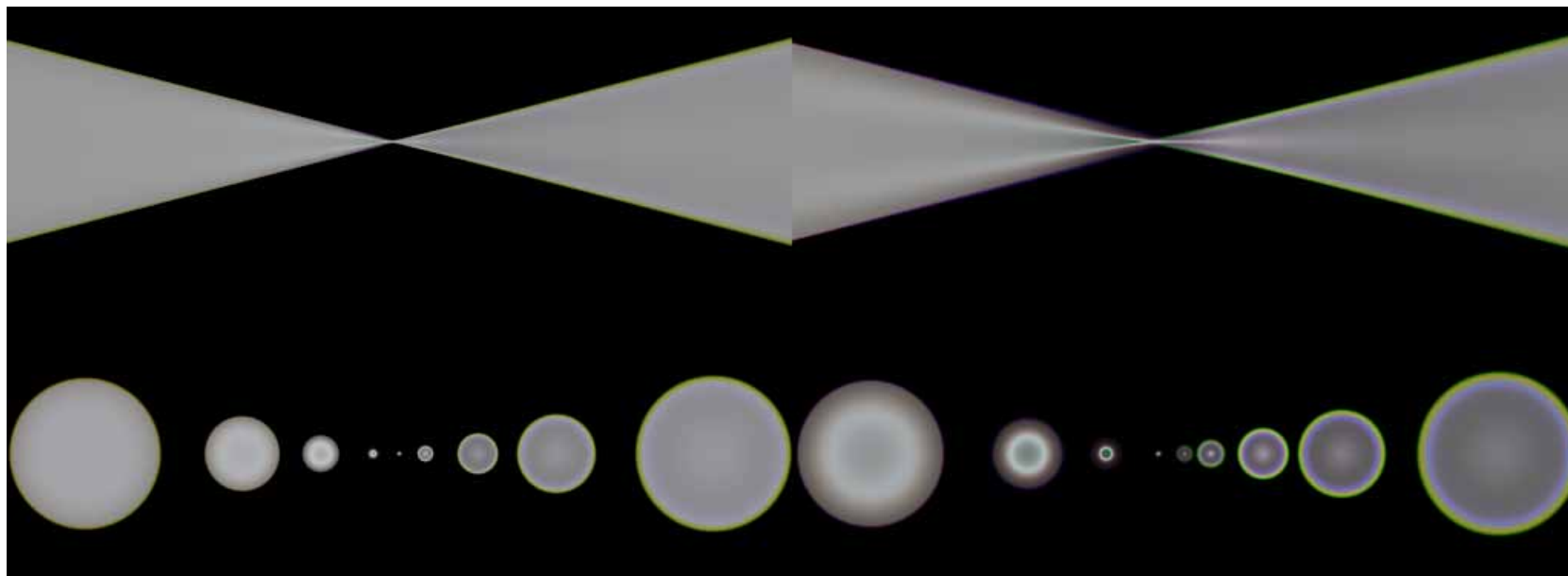
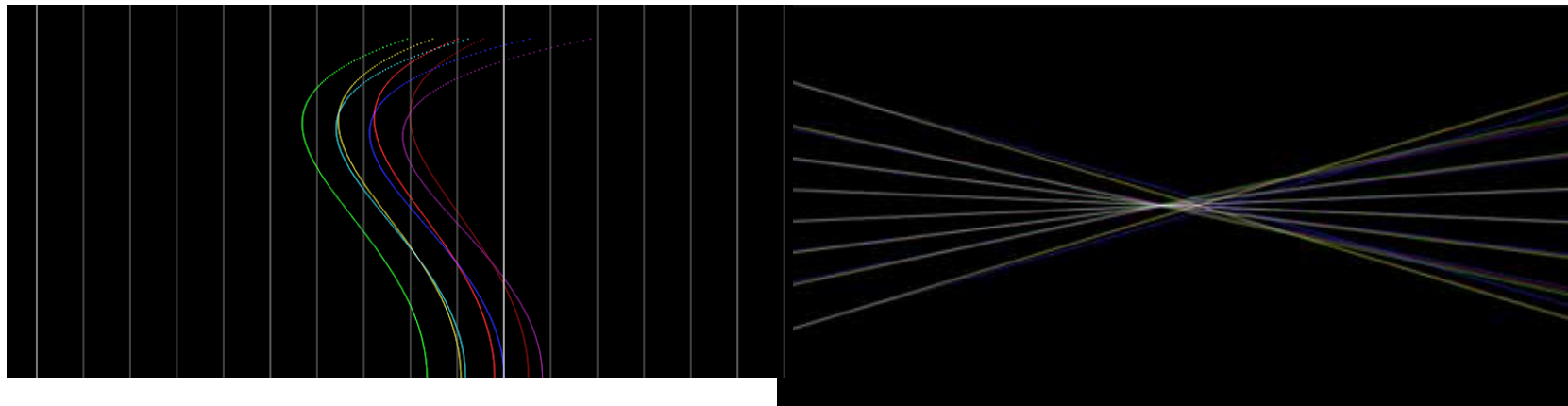




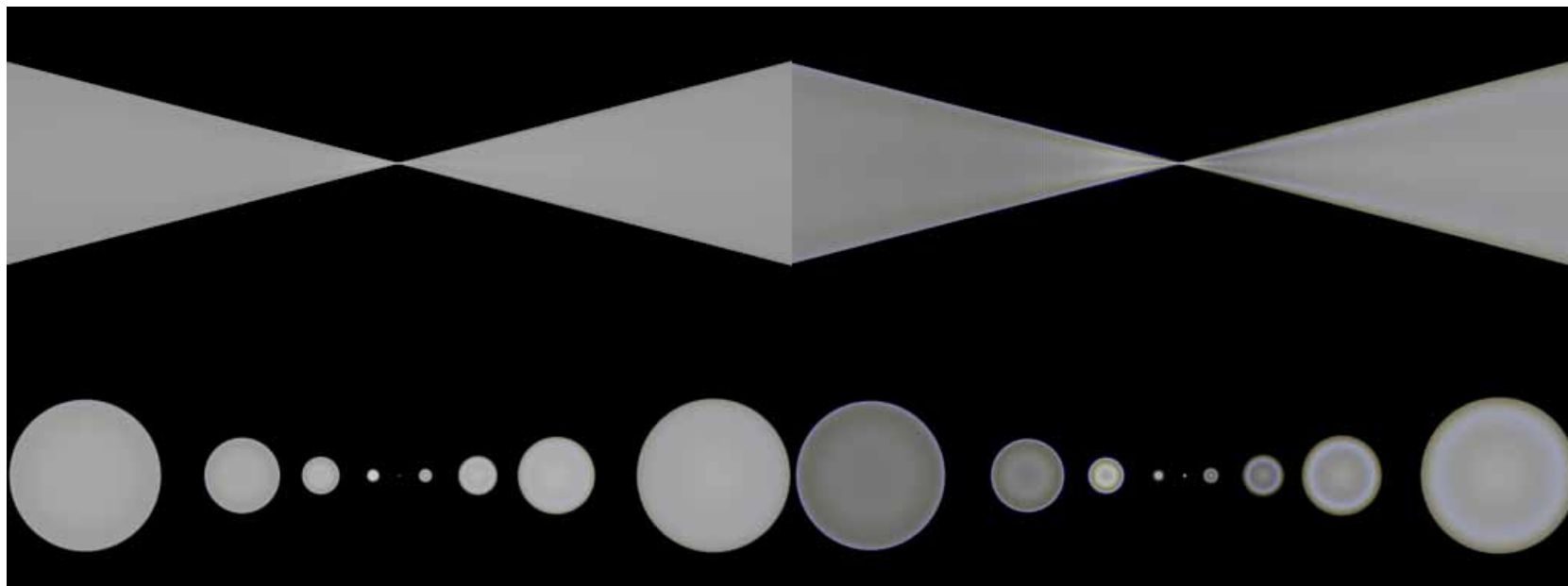
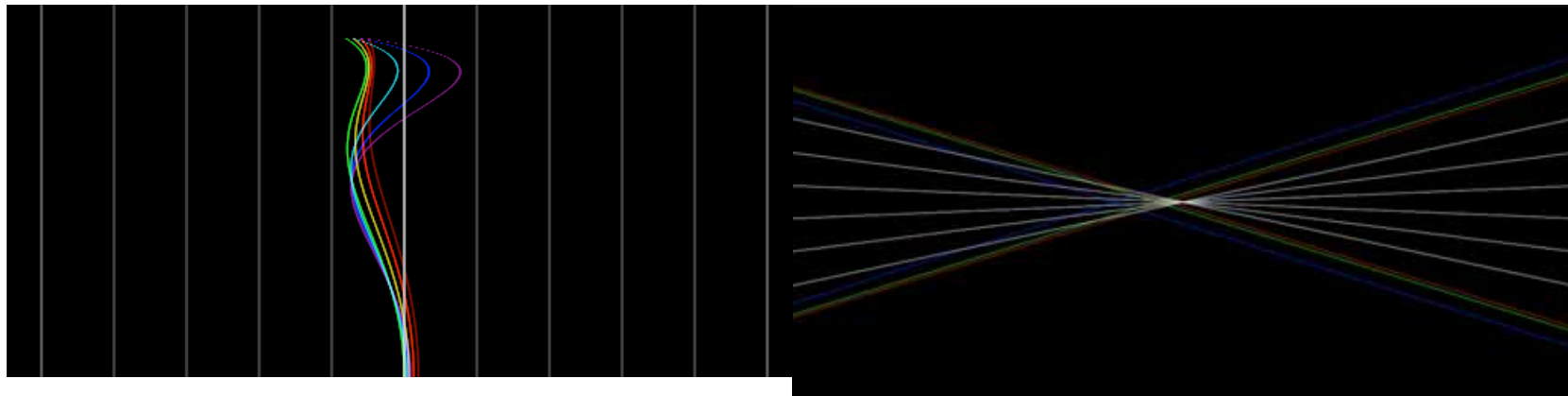
# ダブルレット過剰補正



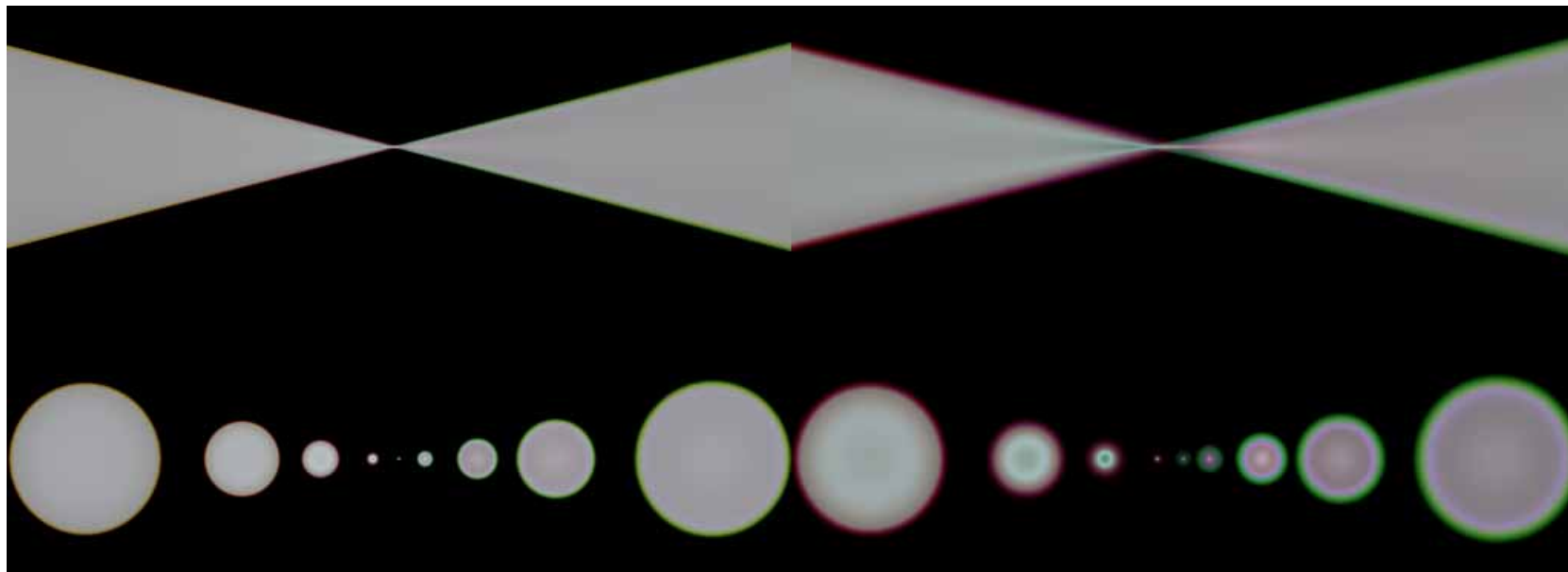
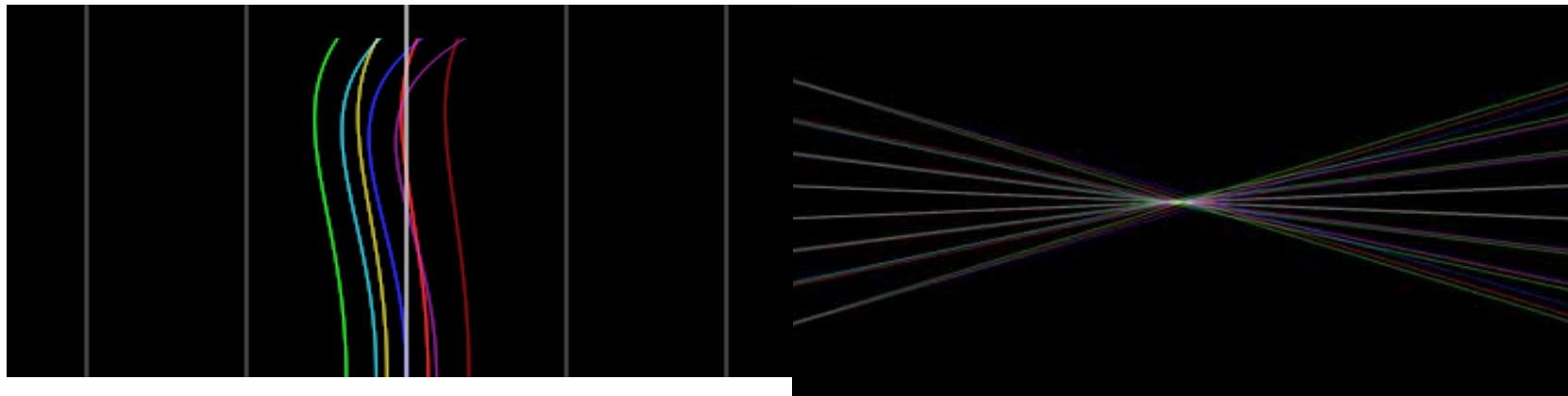
# ダブルレット補正



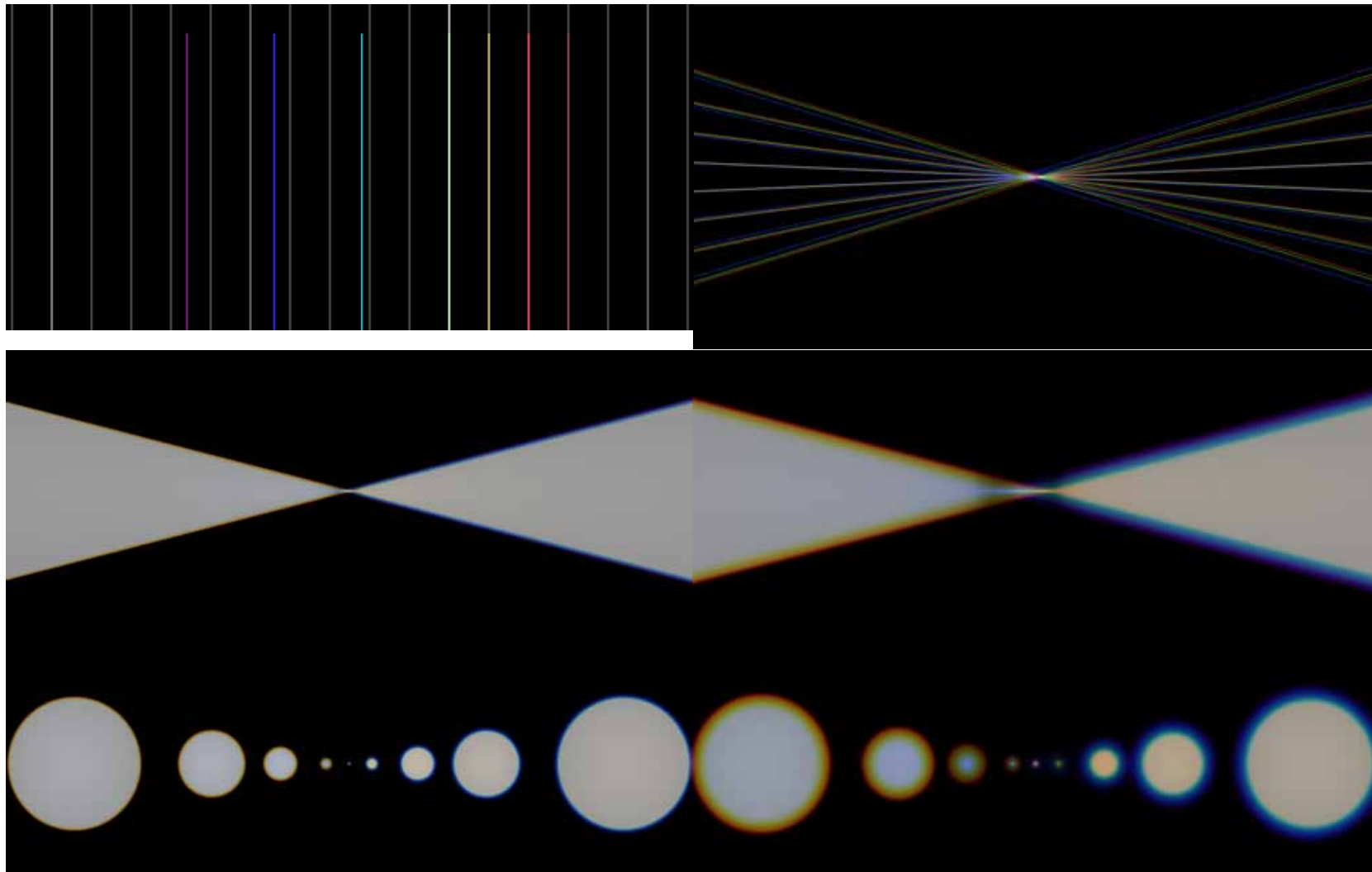
# トリプレット補正



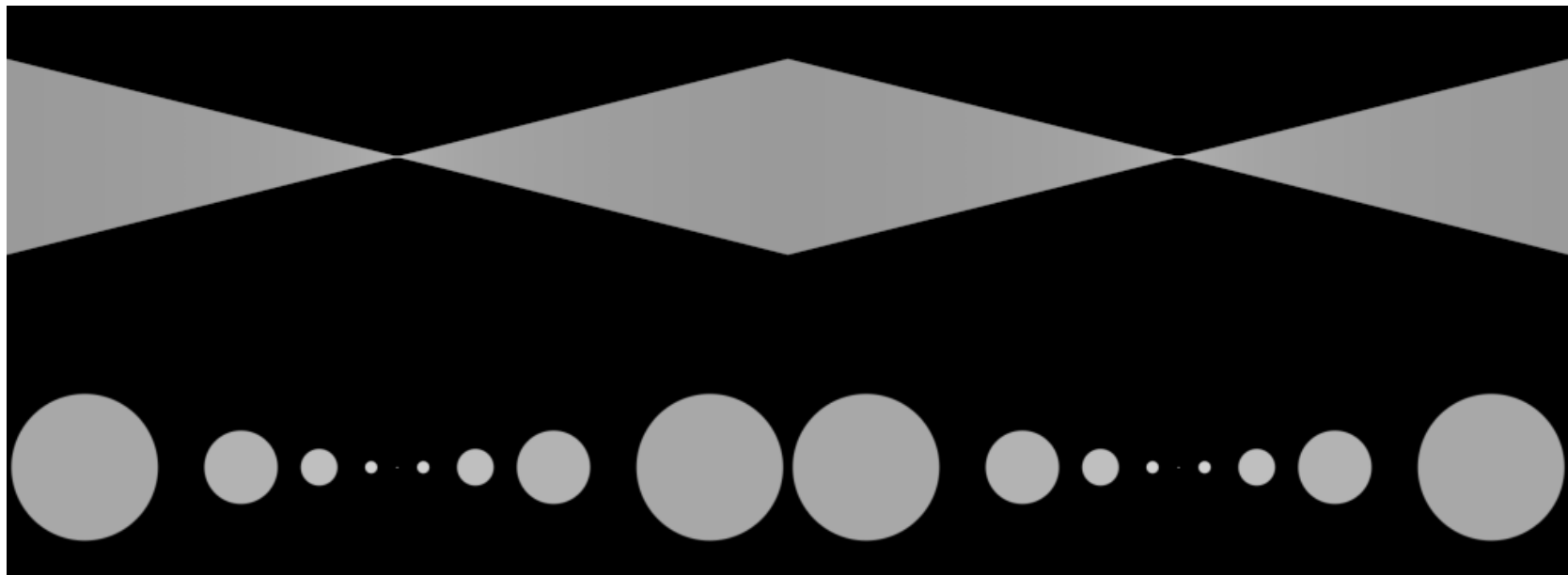
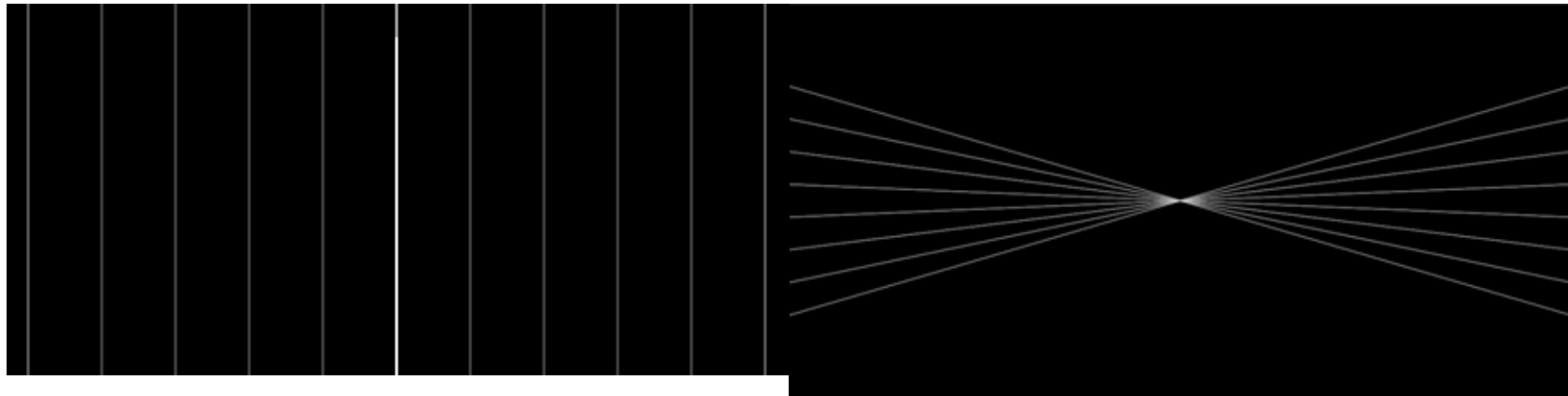
# ダブルレット補正(1/3インチCCD)



# 非球面レンズ(色収差補正なし)



# 収差なしのレンズ(現実には存在しない)



ムケテ、未来。

CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

# 被写界深度エフェクトの実装

ボケテクスチャを使ったエフェクトの適用

# 被写界深度エフェクトの実装

- 現在の光学パラメタから固定値の計算
  - 現在のレンズ設定のフィルム位置などを計算
- ピクセルを走査
- 光学情報からテクスチャ座標の計算
  - 対象ピクセルの深度から結像する位置を計算
  - 結像位置とフィルム位置の差からボケの度合いを計算
  - 現在の光学パラメタによる補正
    - 絞りサイズと対象ピクセルの結像位置を考慮
    - テクスチャ生成時の代表パラメタと比較してスケール
      - 例えば絞りサイズと結像距離がどちらも同じ倍率なら相似と考える
  - ボケテクスチャの座標を計算



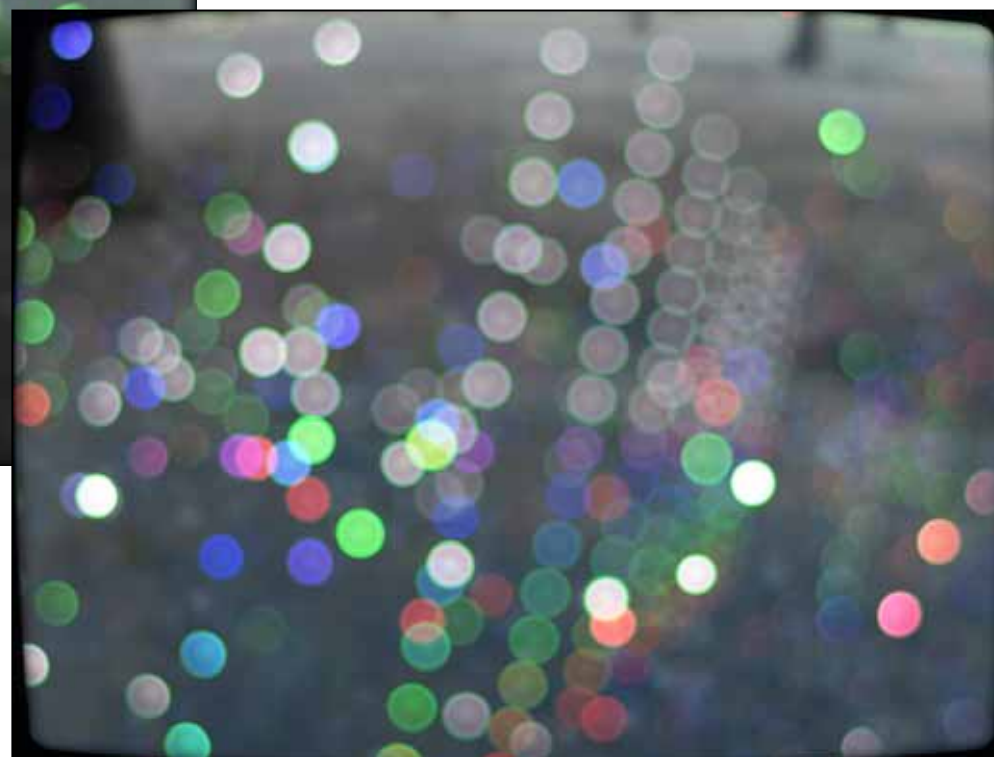
# 被写界深度エフェクトの実装

- ボケ描画用スプライトを生成
  - ジオメトリシェーダで生成
- ボケ用スプライトを加算描画
- というのが最終目標ですが...

# 今回はCPUで実装

- ジオメトリシェーダによる実装まで手を出せなかった
  - 今回はCPUで実装
- CPUで全ピクセル走査は非現実的
  - とりあえず適当に配置した数千個程度の点から生成
    - レガシーなレンズフレアと同様の手法
    - 輝点の情報からそれぞれボケを生成して加算描画
  - 背景部分については従来のギャザーベースで実装

# サンプル画像



# 後ボケ: 補正なし(ソフトフォーカス)



# 前ボケ:補正なし



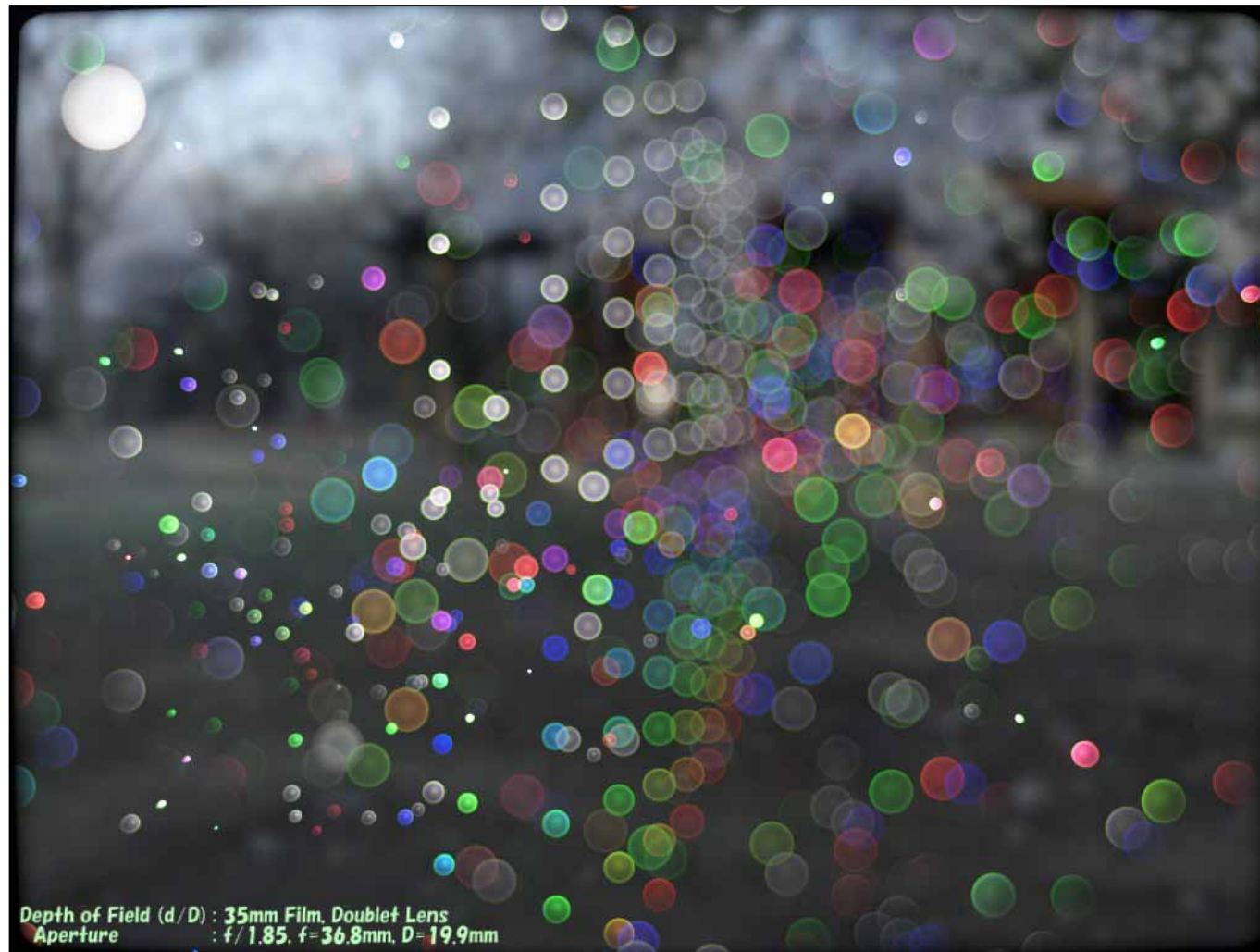
# 後ボケ: ダブルレットレンズ(過剰補正)



# 前ボケ(左一部): ダブルレットレンズ(過剰補正ソフトフォーカス)

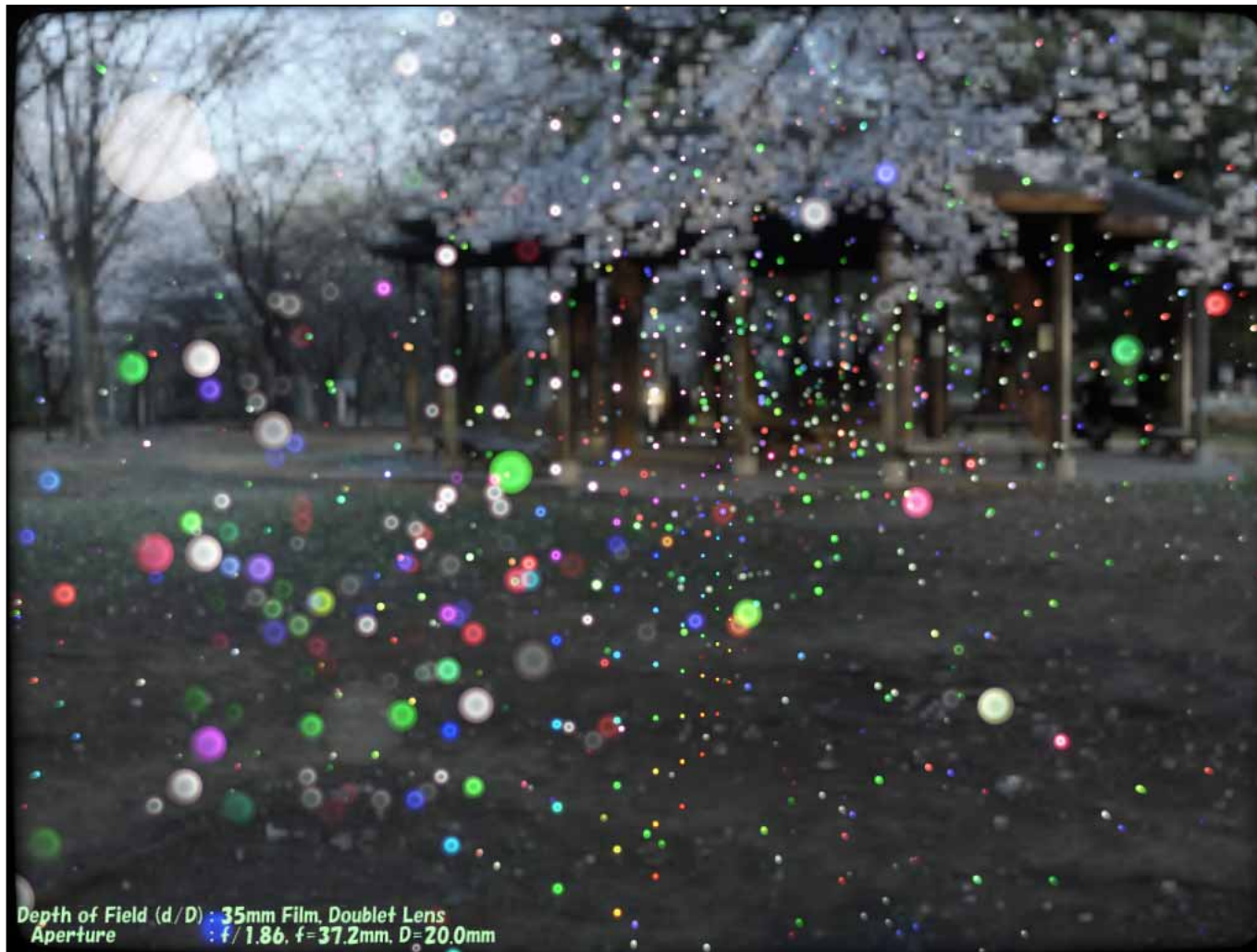


# 後ボケ: ダブルレットレンズ





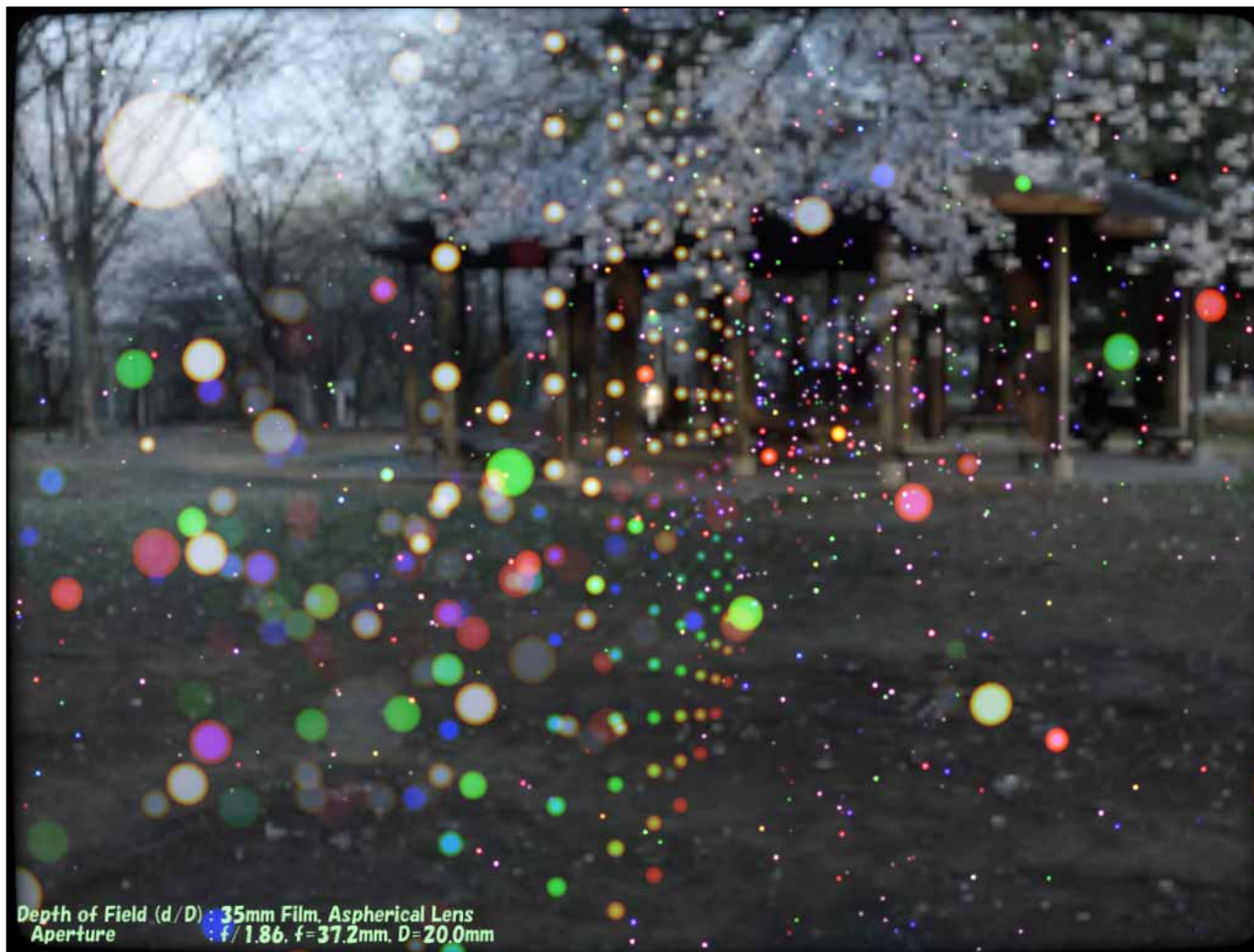
# 前ボケ: ダブルレットレンズ



# 後ボケ:非球面レンズ(色収差補正なし)



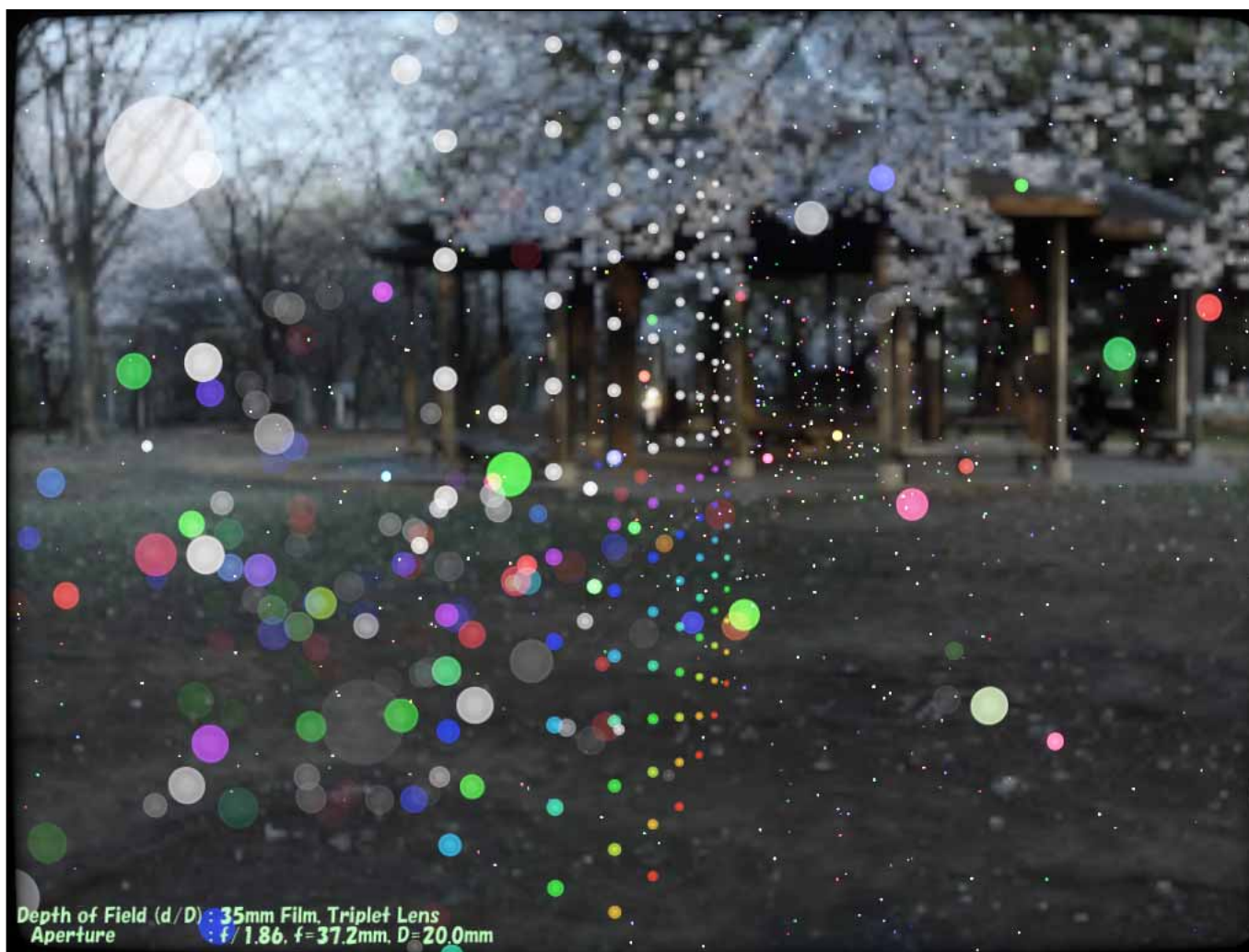
# 前ボケ:非球面レンズ(色収差補正なし)



# 後ボケ:トリプレットレンズ



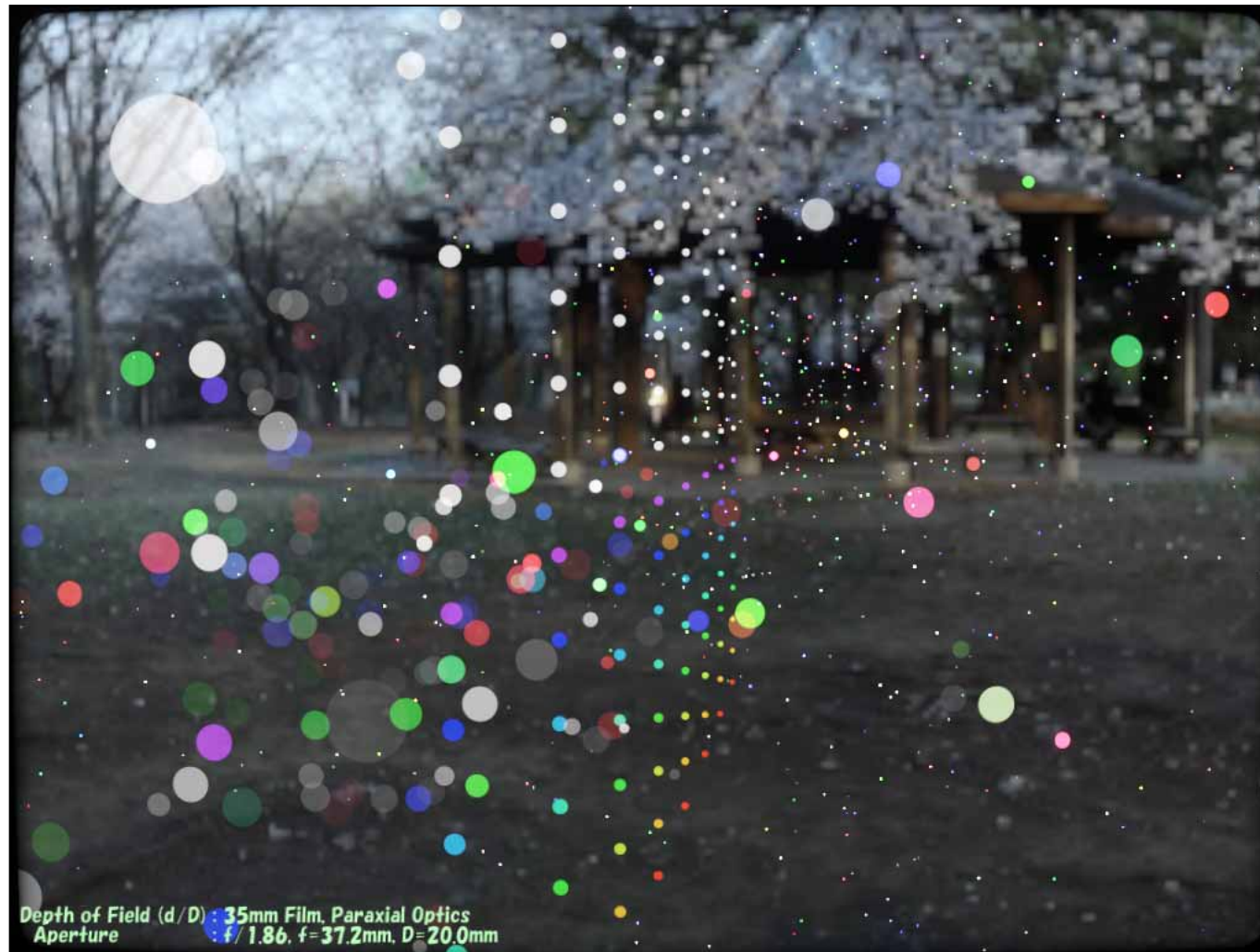
# 前ボケ:トリプレットレンズ



# 後ボケ:収差なし(やや歪曲あり)



# 前ボケ:収差なし(やや歪曲あり)



# 後ボケ: ダブルレットレンズ(1/3 CCD)



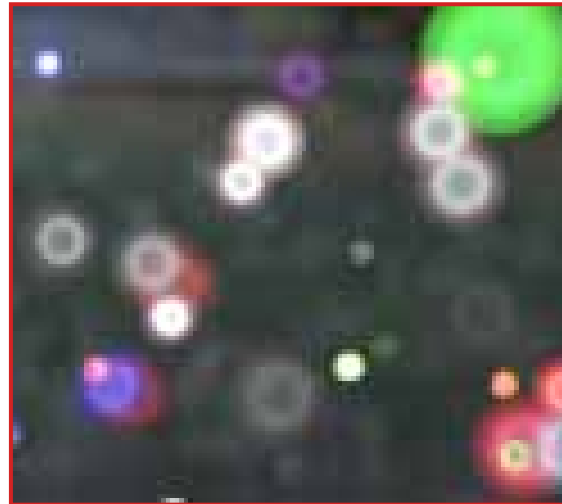
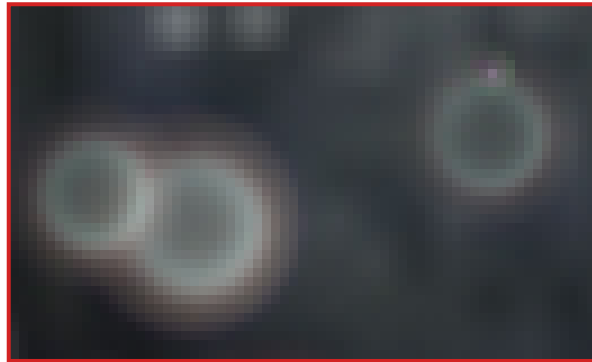


# 前ボケ(左一部) : ダブルレットレンズ(1/3 CCD)

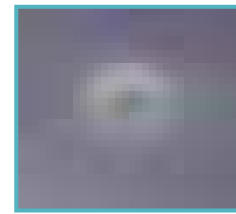
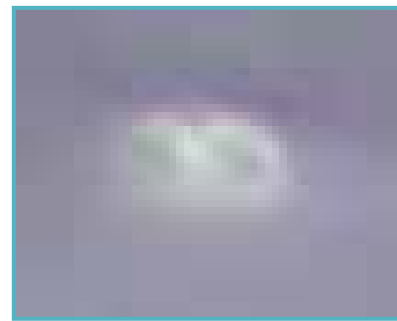
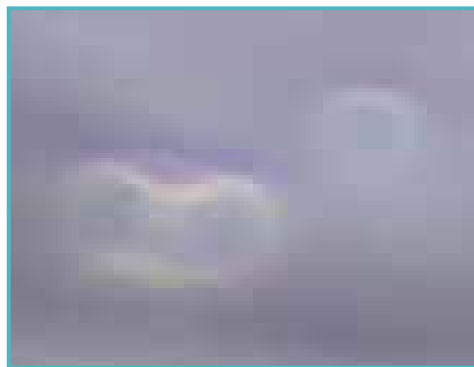


# 比較的小さな前ボケ

エフェクト



写真

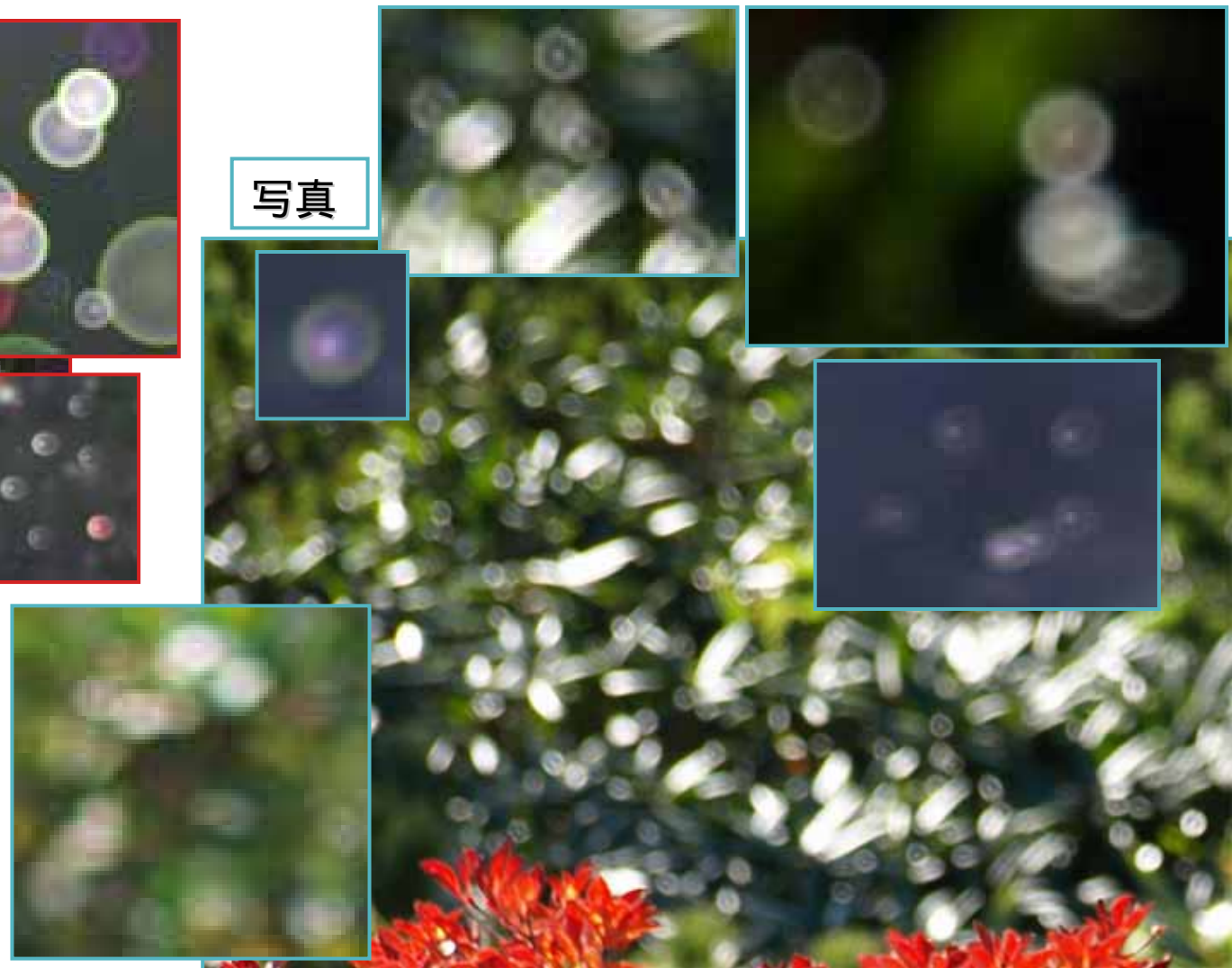


# 比較的小さな後ボケ

エフェクト



写真



# 大きな前ボケ

エフェクト



写真

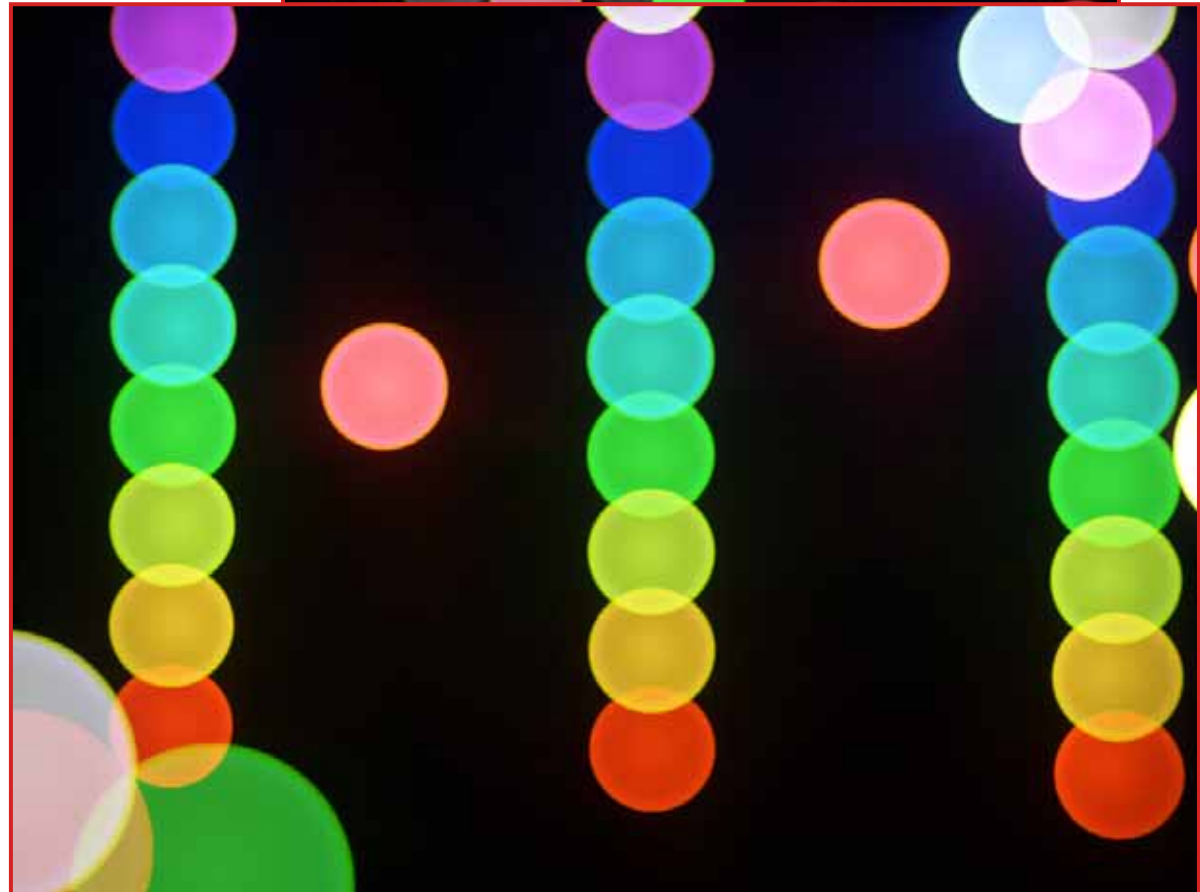


# 大きな後ボケ

写真(左の白は前ボケ)

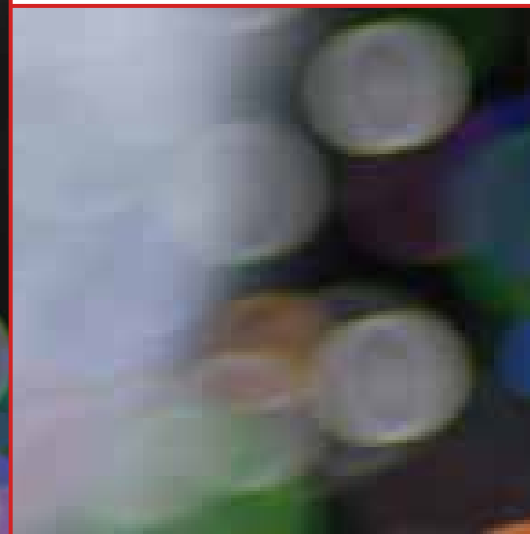
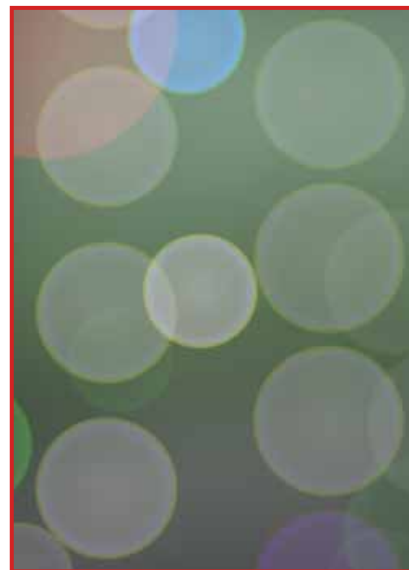
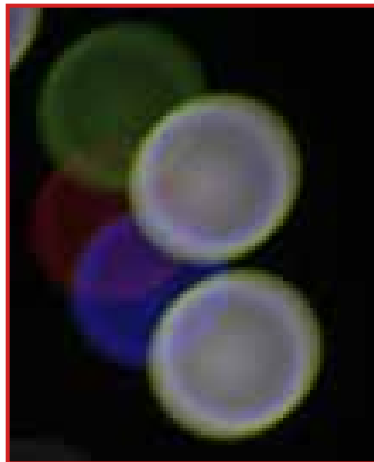


エフェクト



# 大きな後ボケ

エフェクト

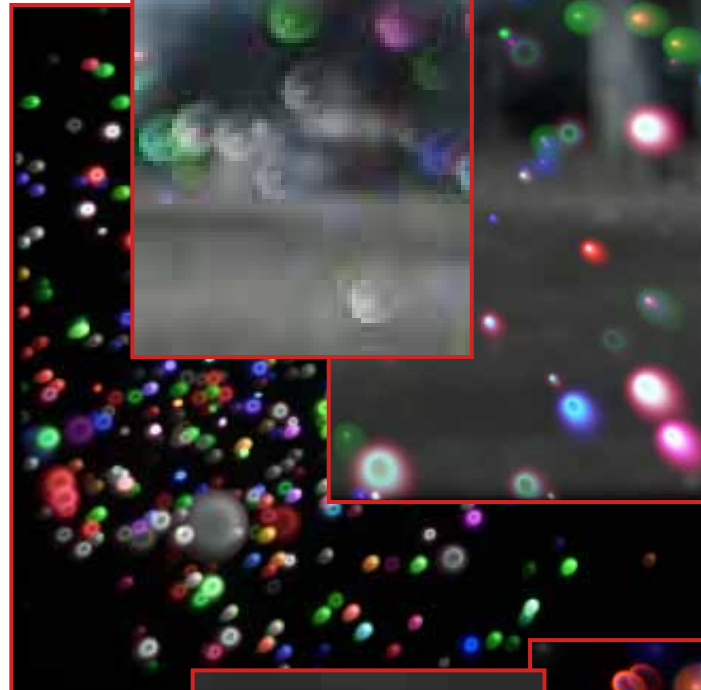
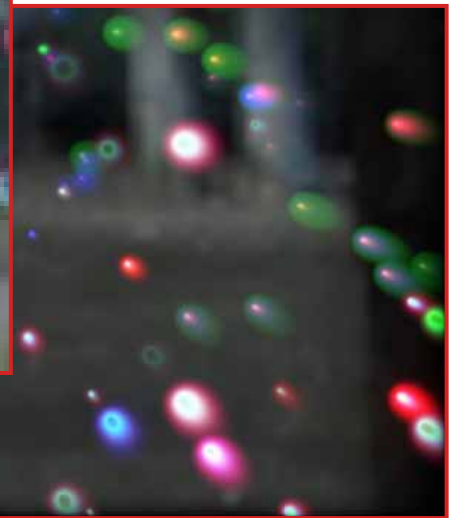
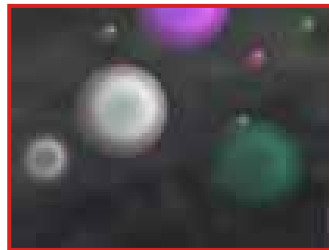
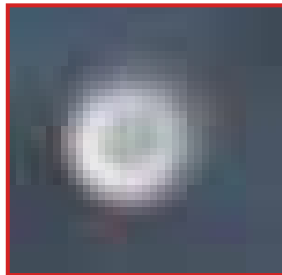
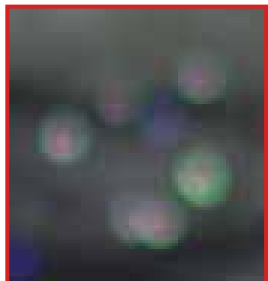


写真

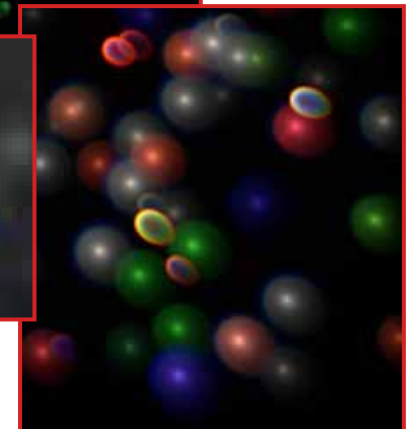
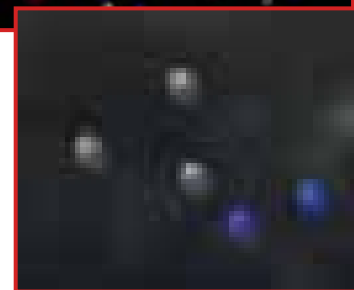
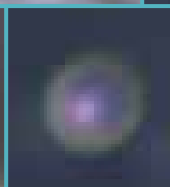
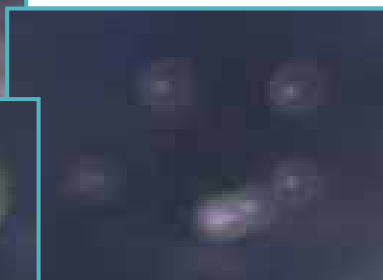
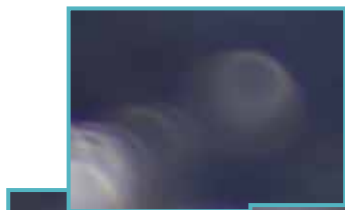


# コマ収差のある小さなボケ

エフェクト

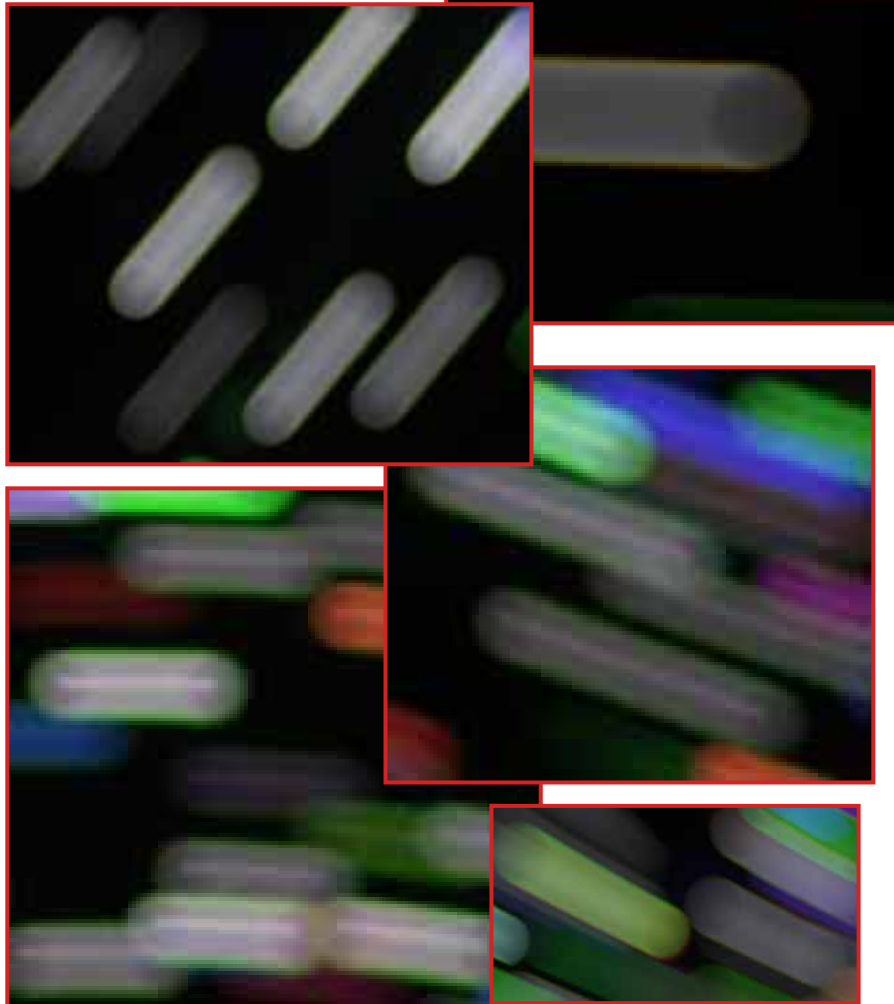


写真

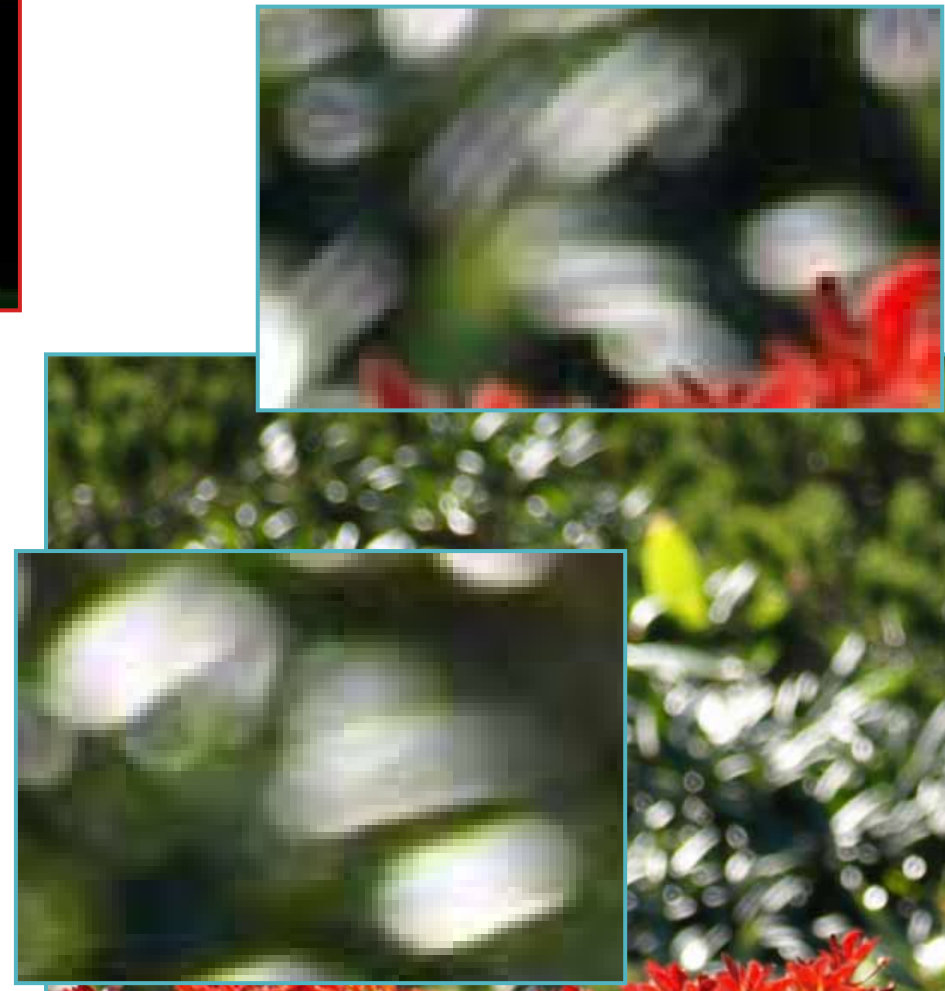


# 二線ボケ / 三線ボケ

エフェクト



写真





ムケテ、未来。

CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

# ボケ味表現のまとめ

## 評価と今後の展望

# メリット

- フォーカス前後のボケ味の違いを表現できる
  - 特にフォーカス付近の連続した変化の表現
- 収差などのパラメタ次第であらゆるボケ味を表現できる
  - ソフトフォーカスレンズ
  - 補正の弱い安価なレンズ
  - 高級な補正レンズ
  - レンズデータがあれば実際に近い見た目を再現できる
    - 汎用性は非常に高い
- テクスチャは事前生成しておける
  - ボケ味の複雑さはパフォーマンスに影響しない

# 評価

- **フィル負荷は極めて高い**
  - ピクセル単位にジオメトリシェーダで生成する場合
  - 現状では縮小バッファは必須と思われる
    - 縮小バッファの解像度でボケ味の表現力が変化する
    - フォーカス付近の小さなボケはできるだけ高解像度で生成したい
- **補正によっては気付きにくい**
  - トリプレットなどの高度な補正レンズのボケ味はあまり判らない
    - 歪曲収差(ディストーション)などによる変形の方が目立つ
  - 実用を考えると
    - 典型的なダブルレット補正など
    - 前ボケと後ボケの数種類程度でも充分

# 評価

- ボケがくっきりと綺麗過ぎる
  - 実際のボケはもう少し荒い
    - 特に小さなボケが目立つ
  - 実際にはボケ元の輝点はある程度の面積をもつ
    - ボケが重なり合ってシャープさが減少する
    - ポストエフェクトで全画素をもとに適用すれば自然になる
  - 実際はレンズの埃などのさまざまな要因でノイジー
    - 大きなボケで可視化されやすい

# 追加したい要素

- 口径蝕があるとよりリアリティが増す
- 円形以外の絞りの表現
  - 三次元テクスチャを使えばそのまま可能
    - レンズ内の傷や埃も表現できる
    - テクスチャメモリを大量に消費する
    - 絞り具合による形状の変化の表現は難しい
      - 四次元か複数の三次元テクスチャが必要になる
      - 絞り具合の種類は少なくとも表現力は充分
  - 二次元テクスチャのマッピング座標を歪ませる
    - 正確ではないが実用性はより高い
    - レンズ内の傷や埃は表現できない

# 試してみたい要素

- 波動光学的な要素
  - ここまでで考慮したのは幾何光学的な要素のみ
  - コンパクトデジカメなどの小型の受光部
    - ボケに回折リングが可視化されることも多い
  - 回折要素をボケテクスチャーつにまとめるのは難しい
    - 収差は一般に絞りサイズの $n$ 乗に比例して大きくなる
    - 回折は絞りサイズに反比例して小さくなる
    - 性質が逆に近いため典型的な組み合わせ一つでは難しい
    - 真面目な実装にはテクスチャの次元を増やす必要がある
  - 真面目な実装の実用性はあまり高くない
    - コストパフォーマンスの問題
      - 典型的な組み合わせ一つだけなら試してみる価値あり
    - 特定の条件でしか効果がない

# 選択的なエフェクト適用の実用性

- 今回のCPU実装のような手法
  - 特定の箇所にボケを直接描画する
    - レガシーなレンズフレアと同じ発想
  - 非常に高速で高品質なボケが可能
  - それ以外の場所は高速なポストエフェクトで
    - ギャザーベースの高速なアルゴリズムなど
- 特にボケを重視したいものの表現に
  - 水面の反射(擬似的にスペキュラーを生成)
  - 夜のイルミネーション
  - カメラのレンズについた水滴や埃
- アニメーションなどでは昔からよく使われている手法
  - 遠景のイルミネーションの表現などによく見られる

ムケテ、未来。

CEEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

# おわり

ありがとうございました



ムケテ、未来。

CEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

# 人材募集中！

シリコンスタジオから人材募集のお知らせ



# シリコンスタジオ人材募集のお知らせ

- シリコンスタジオ人材募集のお知らせ
  - 最新技術に興味のある方
  - 新しいハードウェアプラットフォームに興味のある方
  - マルチプラットフォーム開発に興味のある方
  - 開発環境の構築に興味のある方
  - エンタテインメント業界のために働きたい方
  - ミドルウェア業務に興味のある方
  - 腕に自信のある方
- シリコンスタジオは常に人材を募集しています！

ムケテ、未来。

CEEDEC 2008  
CESA DEVELOPERS CONFERENCE 2008

FOR NEXT  
10  
YEARS

**ご質問は？**