

**レイトレーシングによるマイクロホローカソード  
プラズマ分光計測の空間分解能向上の試み**

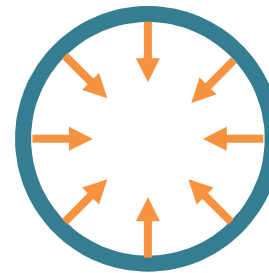
○中井瑞希, 松岡雷士, 難波慎一

広島大学大学院工学研究科機械物理工学専攻

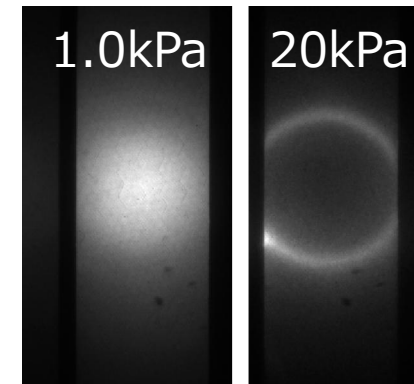
## マイクロホローカソード放電(MHCD)

- ✓ 大気圧グロー放電
- ✓ 低い印加電圧による放電の維持

プラズマ内部の原子分子過程の解明に  
発光分光計測でアプローチ



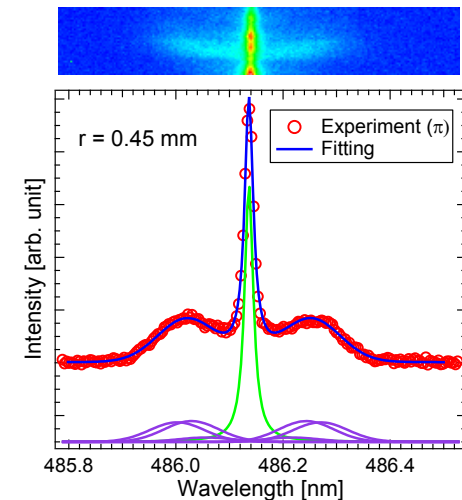
MHCD内部の電場



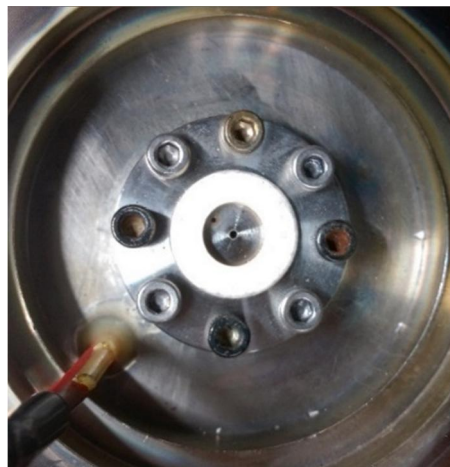
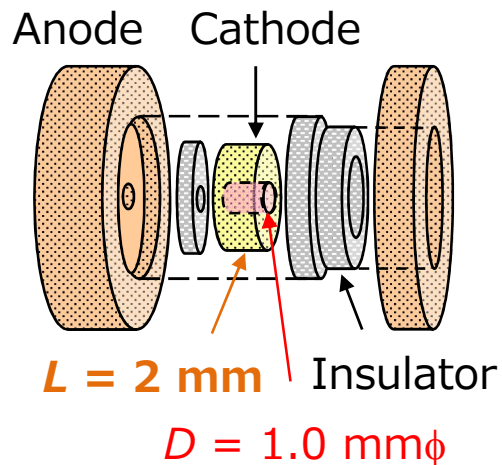
He発光 (492 nm) の  
イメージ

- ✓ 高圧力下では陰極に沿ってリング状の発光
- ✓ シースの形成によって電位が急速に降下  
→強電場の形成
- ✓ シュタルクスpekトル解析による電場強度分布などの  
プラズマパラメータの計測

現在の観測システムでは空間分解能の不足により  
詳細な解析が困難  
空間分解能を向上させることで詳細な電場計測を行う



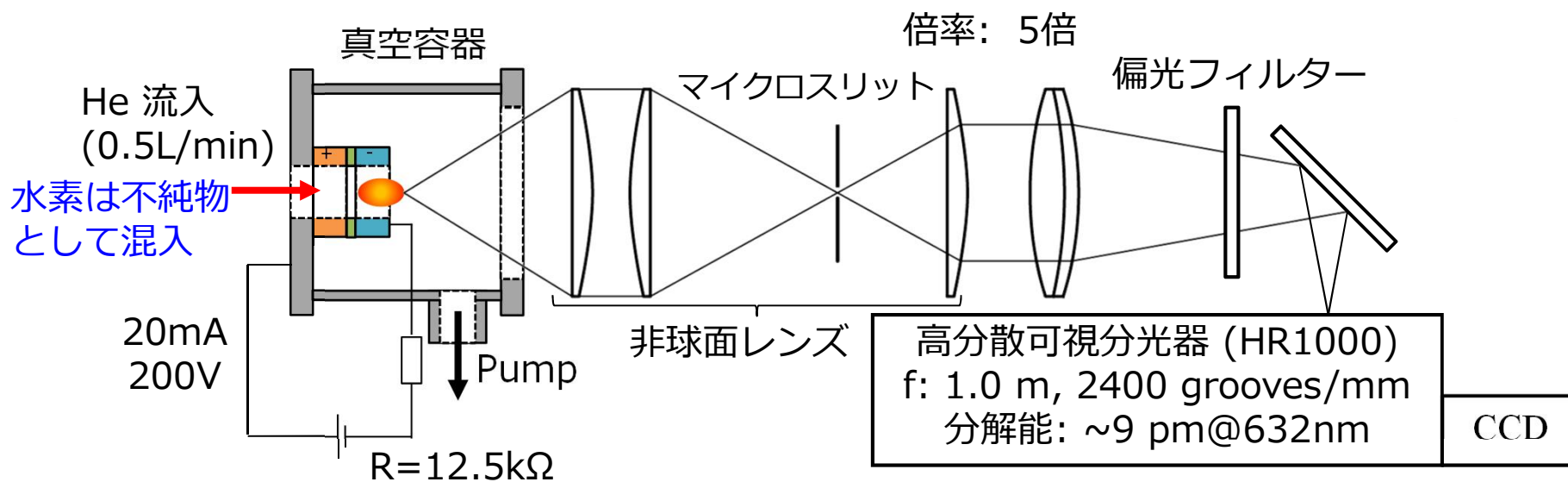
H $\beta$ (486nm)における  
シュタルクスpekトルの例



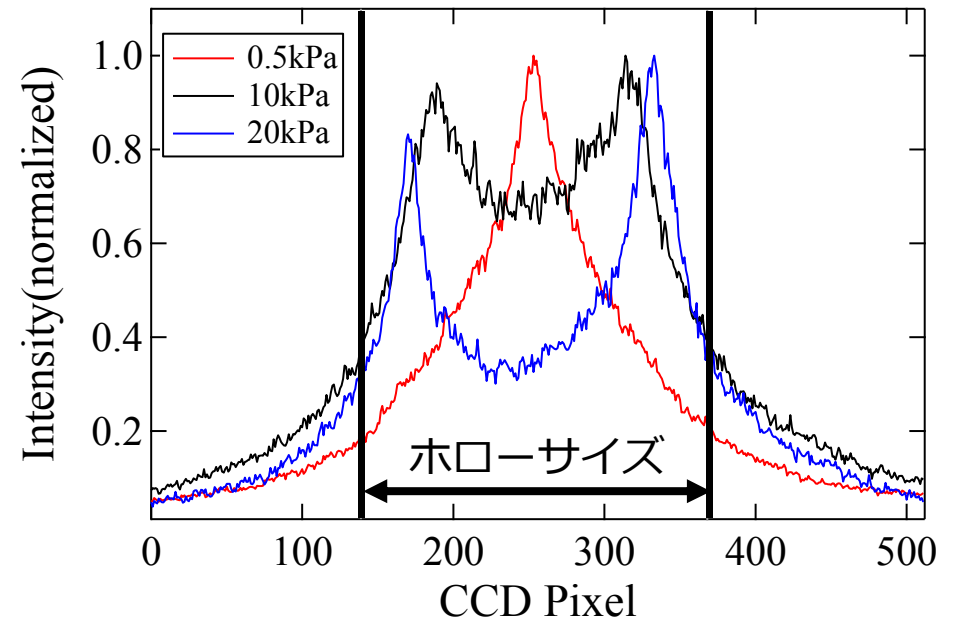
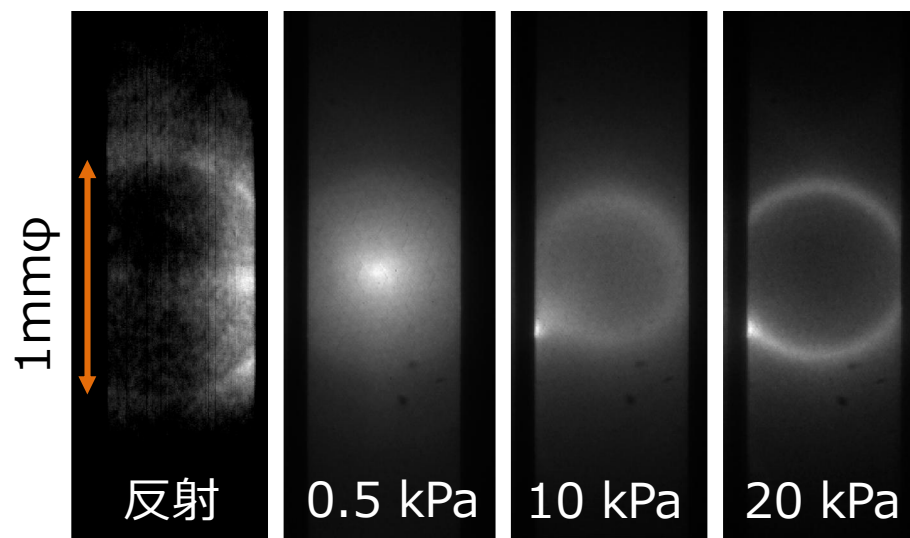
ホローカソード電極



放電の様子

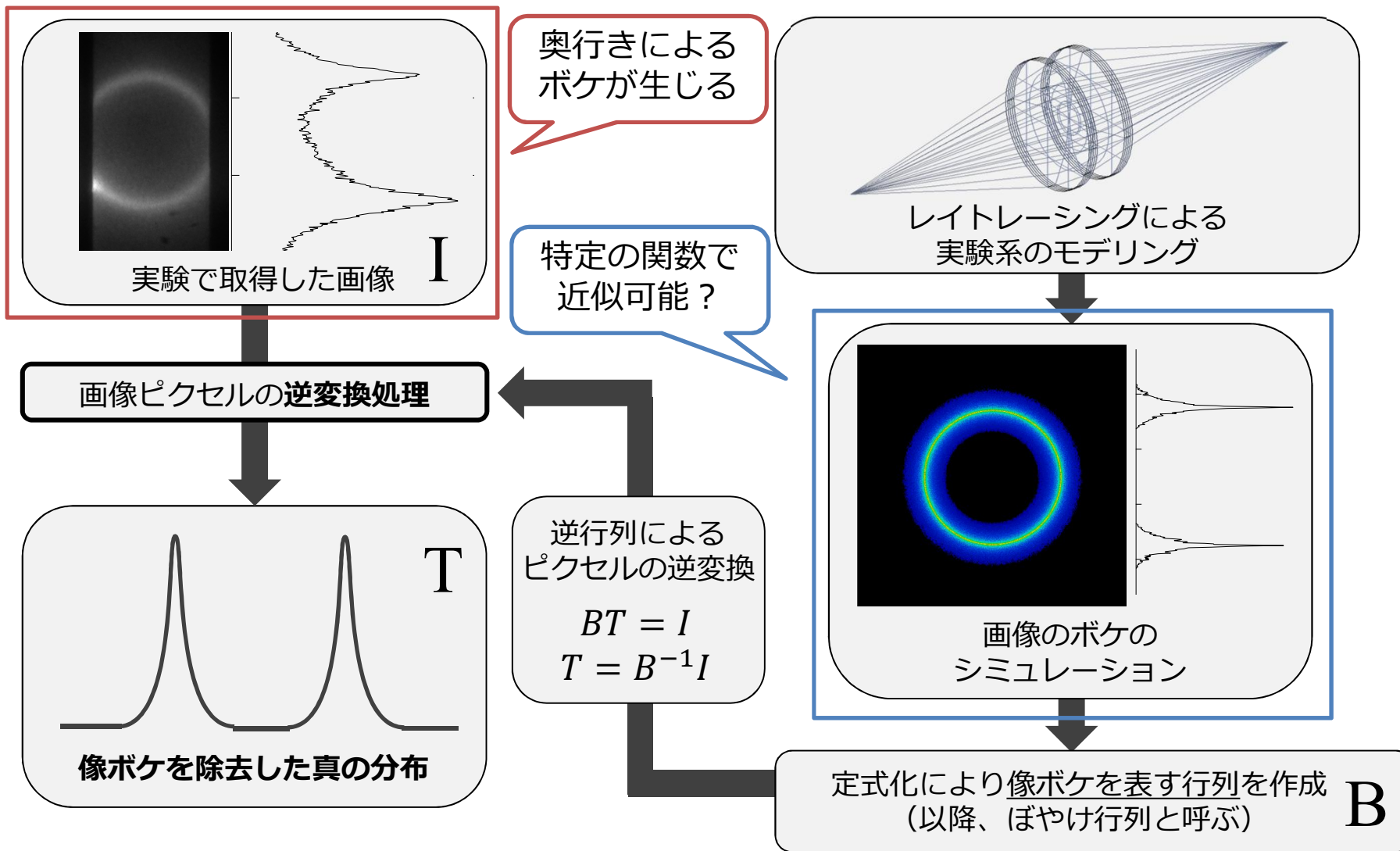


観測システム



473nmCWレーザー反射と各圧力における He (492 nm)の発光イメージの比較      スリット中央の光量分布と反射から求めたホローサイズの比較

- 発光の裾野が明らかにホロー壁面をはみ出て分布
- 観測光学系の被写界深度がプラズマの発光領域より短いことにより空間的に手前や奥の成分のピントがボケて重なっている  
→空間分解能の低下
- 画像処理の工夫でキャンセルできないか？

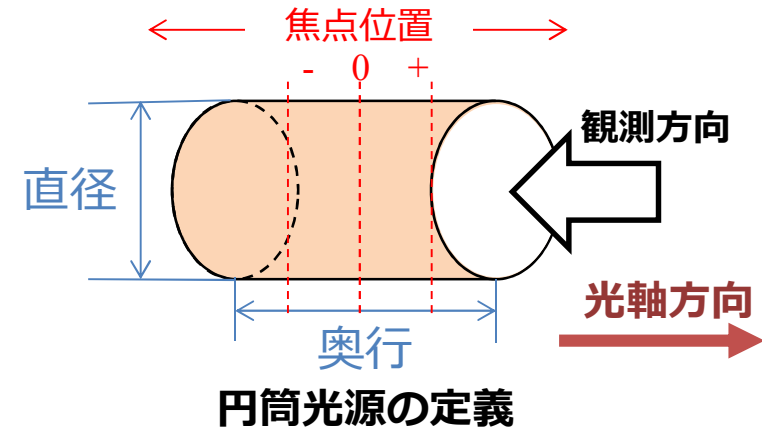


レイトラシング解析による逆変換画像処理を構築しマイクロプラズマ分光計測の空間分解能の向上を目指す

プラズマ発光のモデルとして表面のみが発光する円筒光源を定義

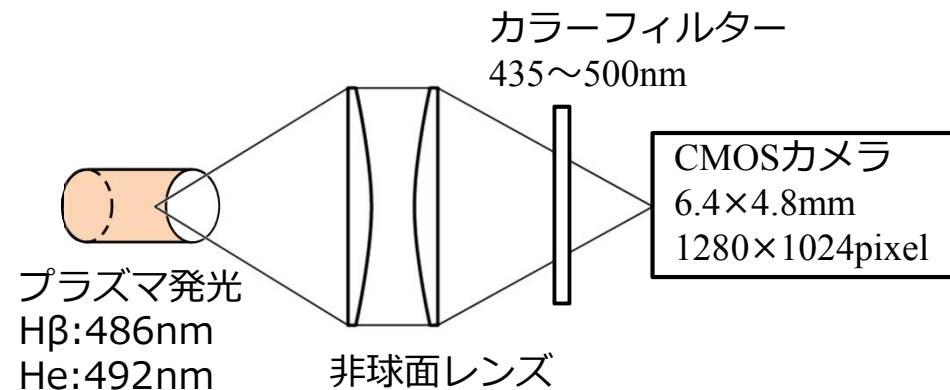
- ✓ 光源の奥行
- ✓ 光源の直径
- ✓ 光学系の焦点を合わせる位置

→ 像ボケにどのような影響を与えるかを画像シミュレーションによって検証し関数による定式化を試みる



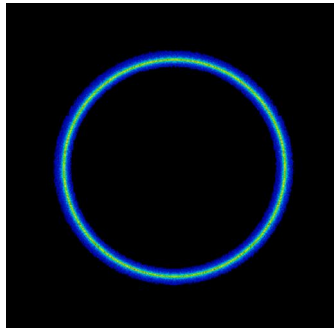
画像処理を行うには画像取得時の装置構成をシミュレーション上で再現する必要がある

今回は簡単にするためレンズ2枚の簡易的な構成で画像を取得しシミュレーションも同様の構成について行った

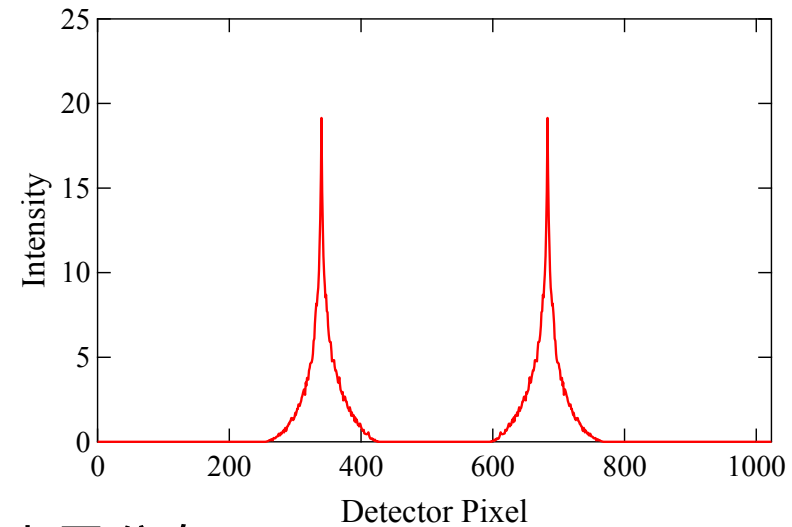
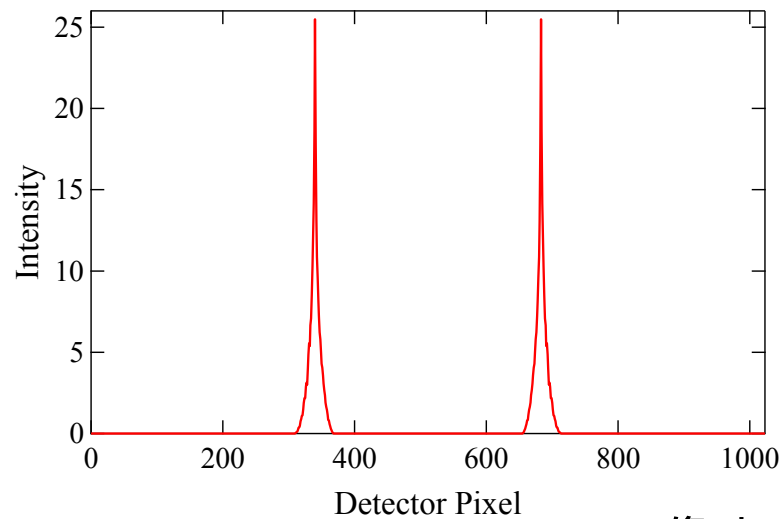
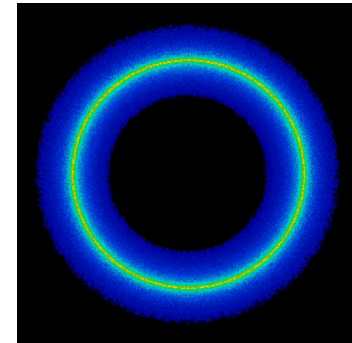


今回検討した装置構成

直径 1mm  
奥行 2mm

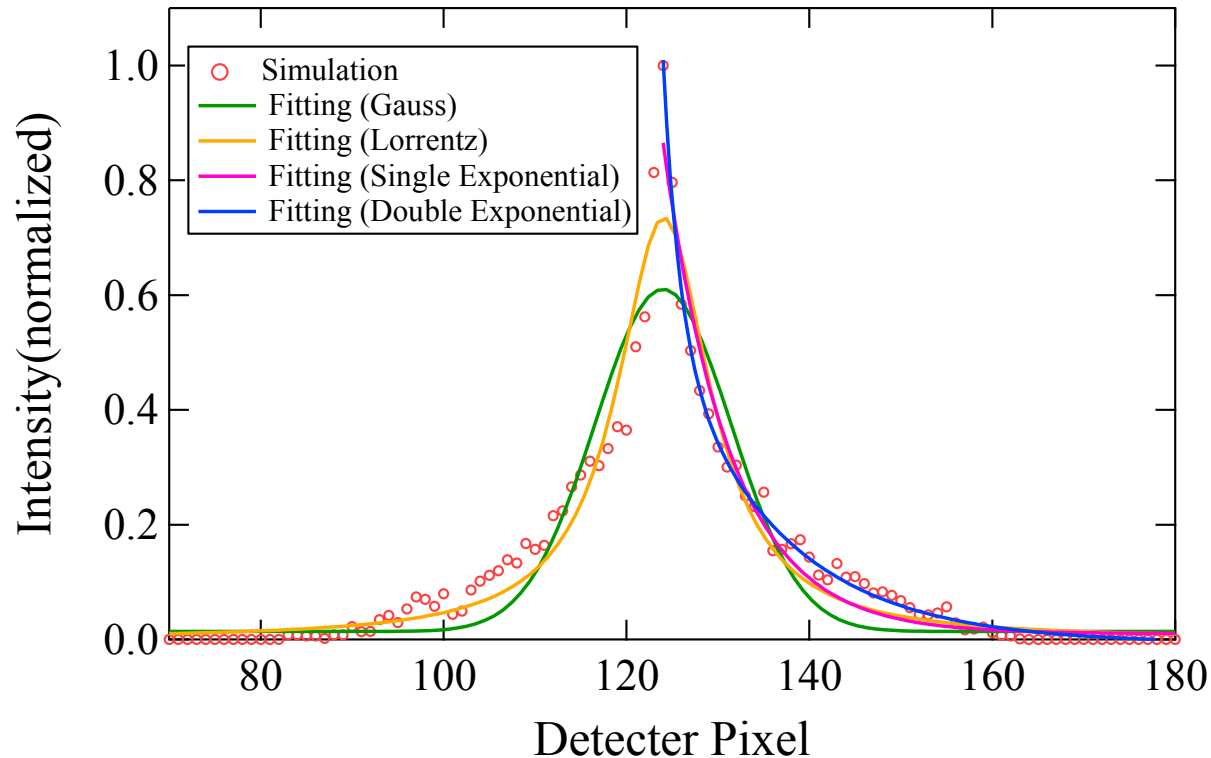


直径 1mm  
奥行 6mm



画像中央での光量分布

- ✓ 奥行が長くなるにつれてボケが拡がることをシミュレーションで確認
- ✓ ボケの分布をなんらかの関数で表現できないだろうか？



$$y_0 + A \exp \left\{ \frac{-(x - x_0)}{\tau} \right\}$$

**Single Exponential**

$$y_0 + A_1 \exp \left\{ \frac{-(x - x_0)}{\tau_1} \right\}$$

$$+ A_2 \exp \left\{ \frac{-(x - x_0)}{\tau_2} \right\}$$

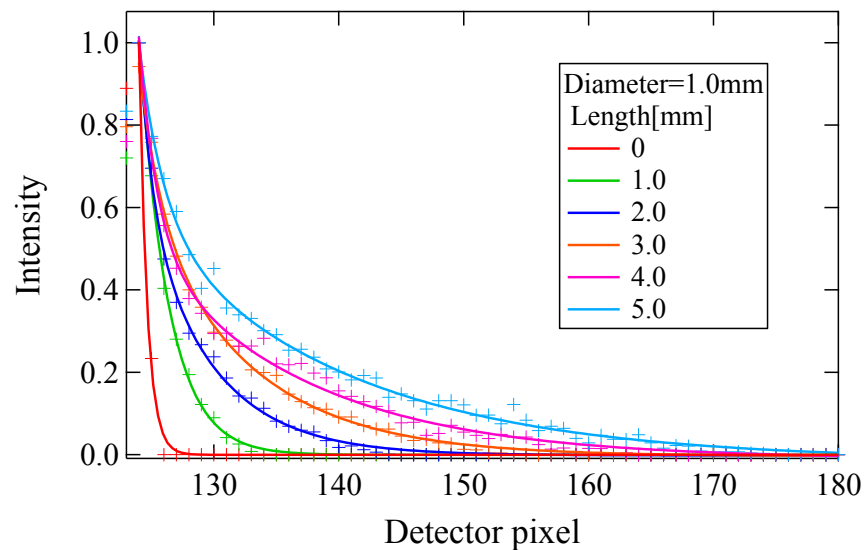
**Double Exponential**

奥行6mmのシミュレーション結果のフィッティング

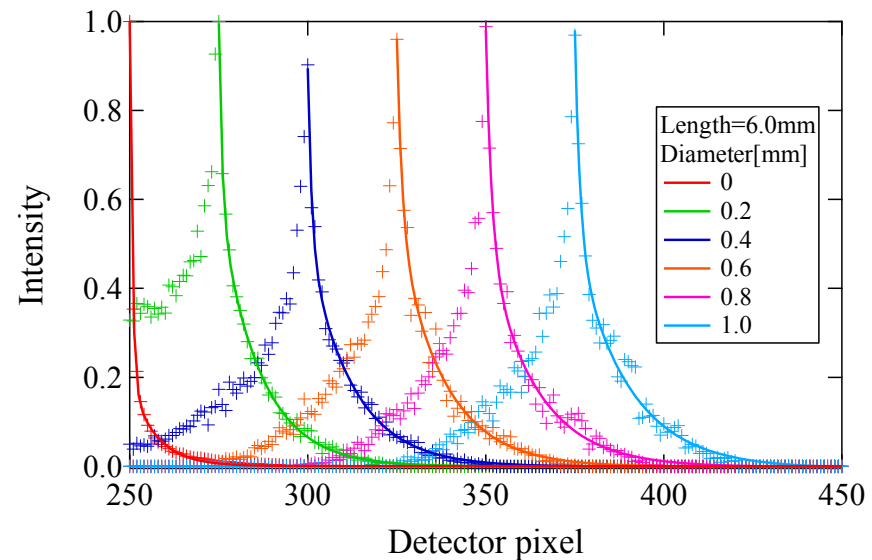
- ✓ Double Exponentialでかなり精度よく近似することが出来た
- ✓ 以降、Double Exponentialでボケの定式化を進めていく



## 光源の奥行きおよび直径とボケの大きさの関係を検証



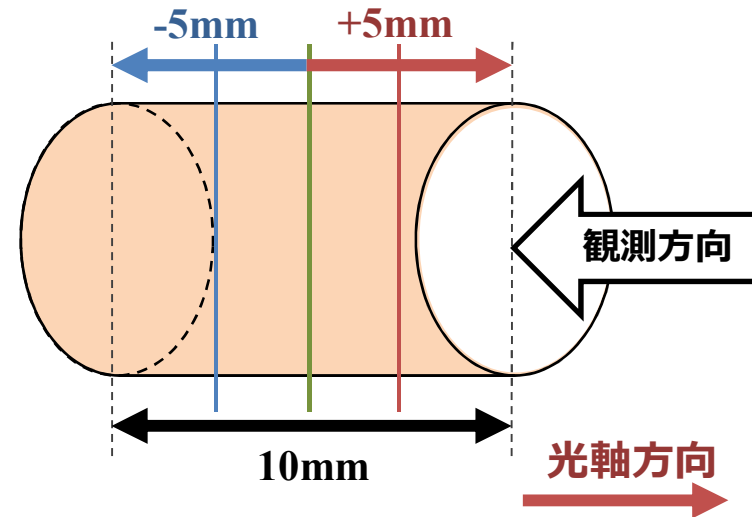
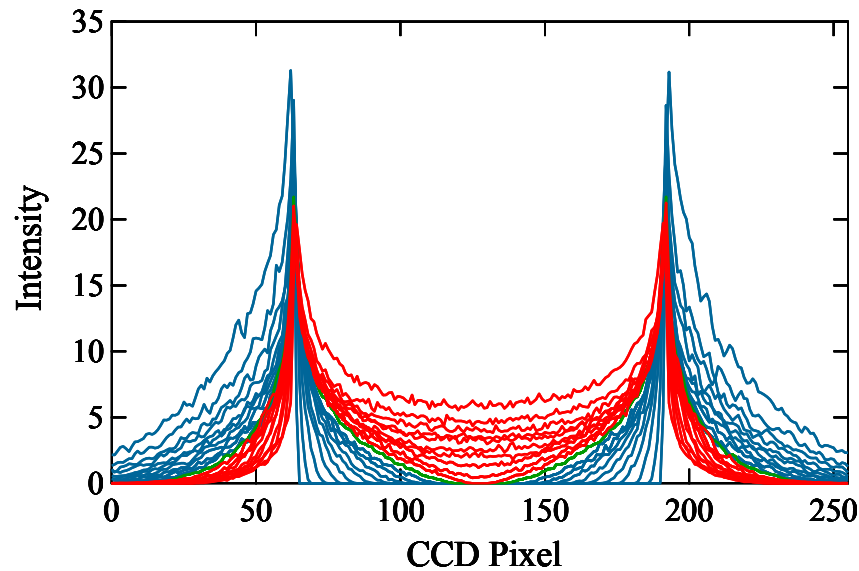
光源の奥行とボケの大きさの関係



光源の直径とボケの大きさの関係

- ✓ ボケが大きくなってもDouble Exponentialフィットは可能
- ✓ 直径がある程度以上になるとボケの大きさとの相関はない
- ✓ 実際のプラズマの発光領域は直径0.5mm以上のため直径による影響を考慮する必要はない

焦点が光源の中心からズレているときの像ボケを検証



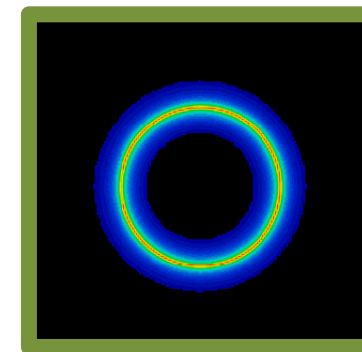
## 画像中心での光量分布

焦点の位置が光源の中心から

プラス側にある → 像は**内側**にボケる

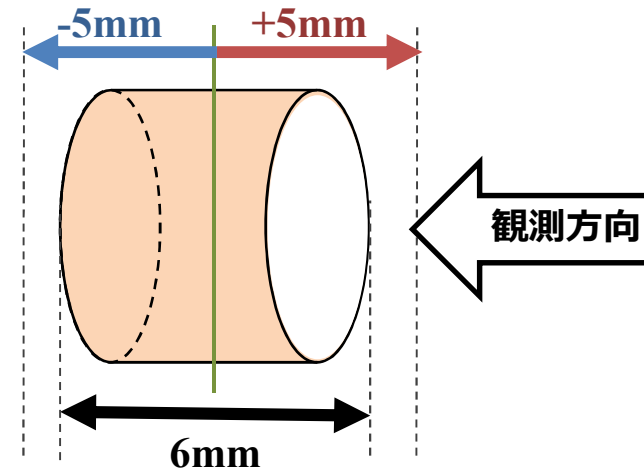
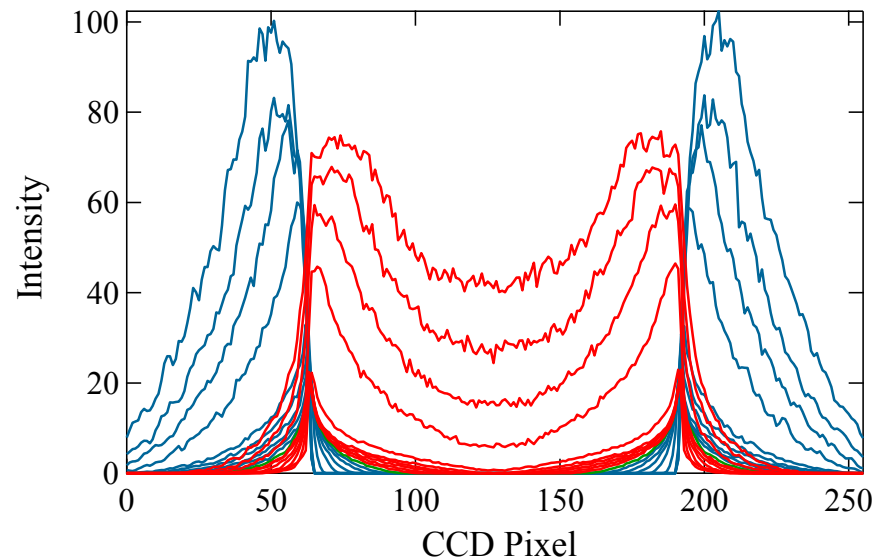
マイナス側にある → 像は**外側**にボケる

Double Exponentialフィットは可能



シミュレーション画像

焦点位置が光源から完全に外れるとどうなるか？



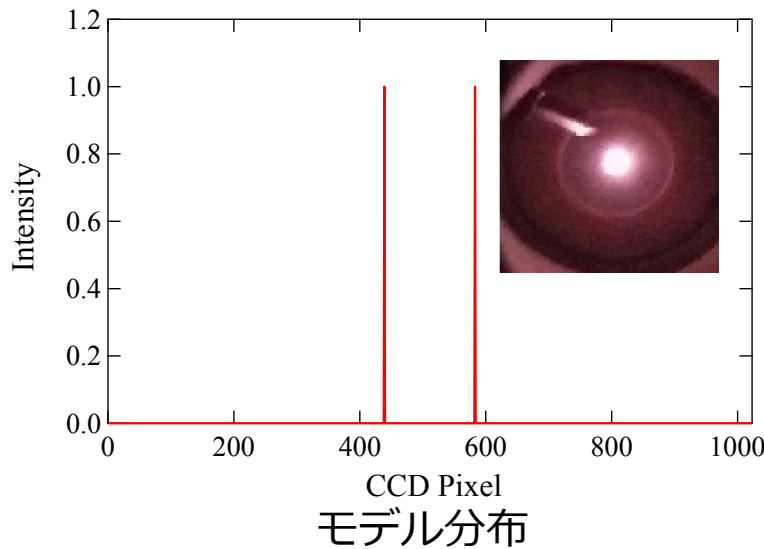
画像中心での光量分布

- ✓ 焦点の位置が光源の内部から外れるとDouble Exponentialではフィットできなくなる
- Double Exponentialをもとに逆変換画像処理を構築すれば変換が成功する領域からプラズマの長さが推定できる

以上の結果を考慮し様々な条件でシミュレーションを行いDouble Exponentialパラメータ ( $\tau, A$ ) を求め、ぼやけ行列を生成、逆変換画像処理を行う

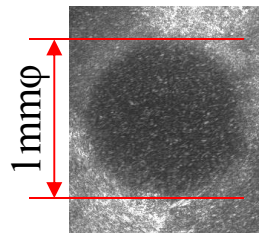
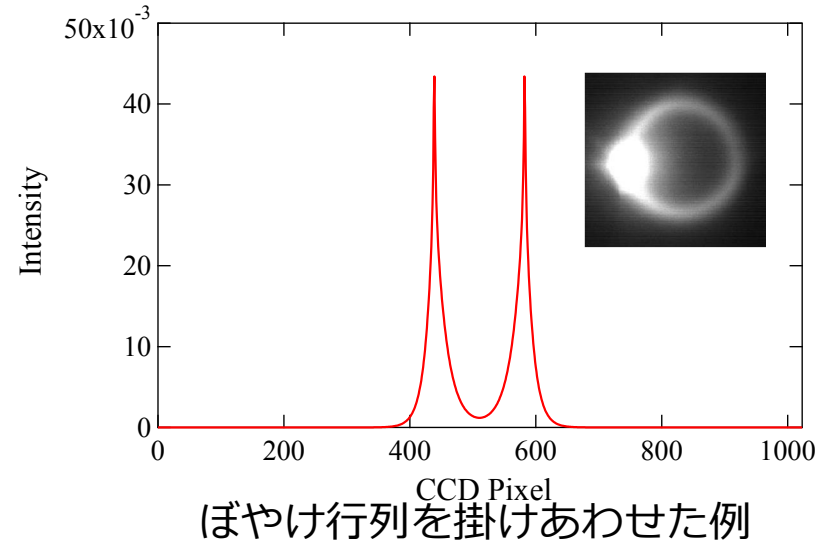
# 逆変換画像処理

- 様々な条件でシミュレーションを行いDouble Exponentialパラメータ( $\tau, A$ )を求める
- パラメータからぼやけ行列( $B$ )を生成し、その逆行列を画像にかける
- 変換の成否からプラズマの発光領域を推定

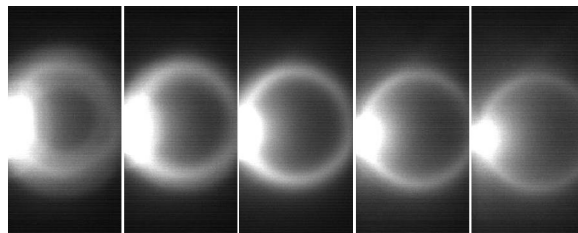


$\times B$

$\times B^{-1}$



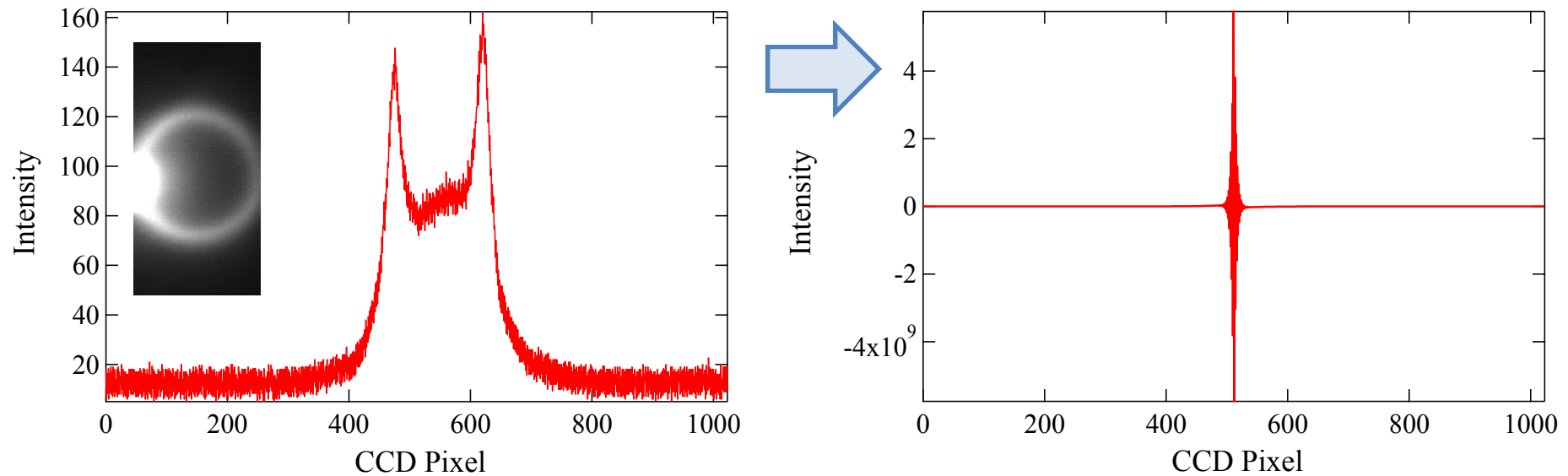
陰極前面の  
レーザー反射



-4mm -2mm 0mm 2mm 4mm  
変換をかける画像  
(20kPaで取得)

## シミュレーション条件

光源の直径	0.67mm (20kPaにおける発光領域)
光源の奥行	2, 4, 6, ..., 24mm
焦点位置	光源中心の前後5点(1mm間隔)

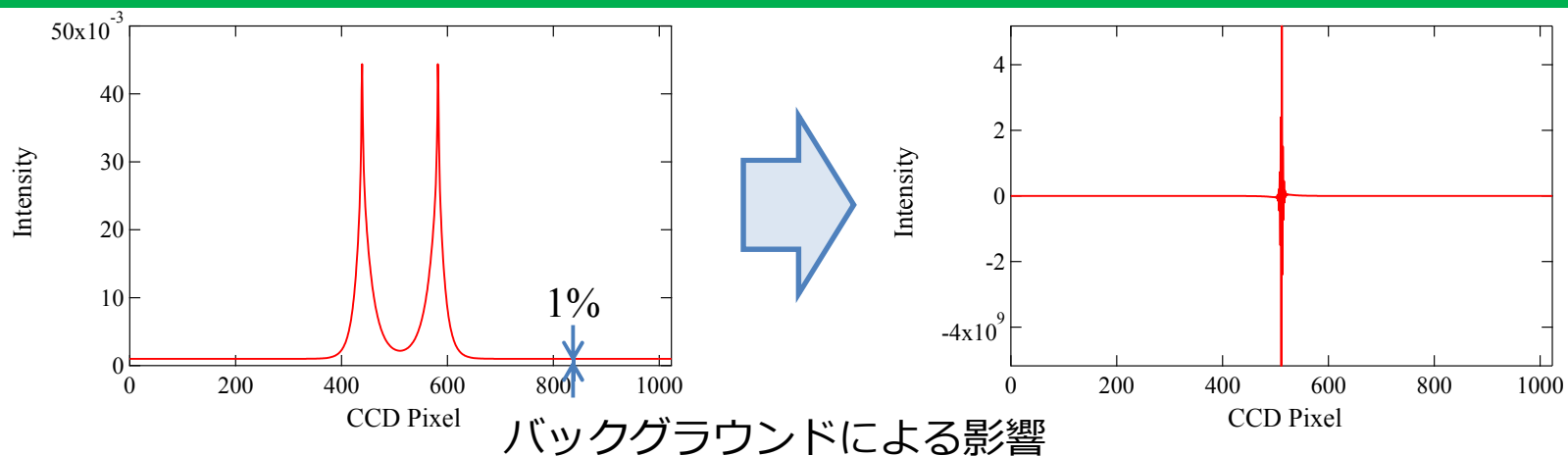


変換結果の一例

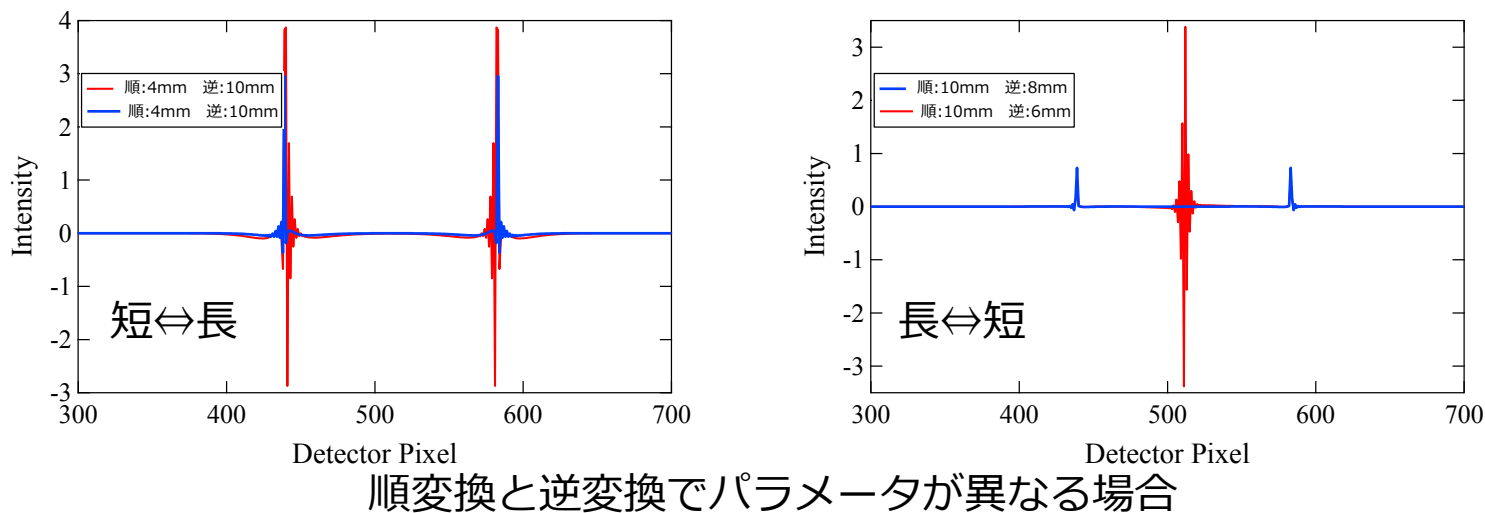
- 変換行列をかけることで中央に非常に大きなエラーが現れた
- 全パターンで同様のエラーが発生
- 画像のバックグラウンドが大きすぎるため？
- 変換に用いたパラメータが実際のプラズマと異なるため？

# エラーの原因について

13/15

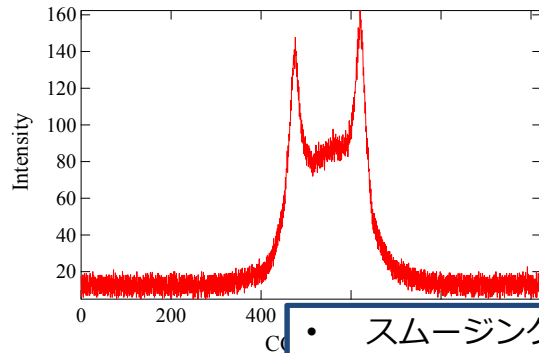


各ピクセルでのバックグラウンドが積算され非常に大きなエラーとなって現れるため  
変換前に画像のバックグラウンドを取り除く必要がある

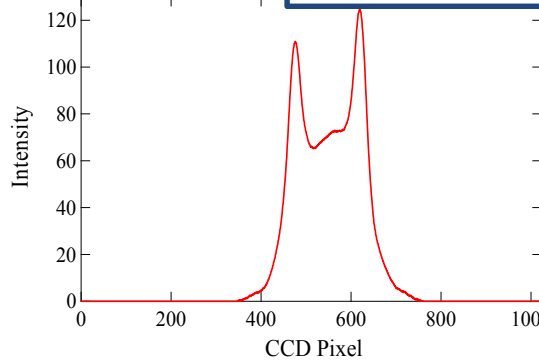


逆変換に用いるパラメータが異なるとエラーが現れる  
特に逆変換に用いるパラメータが順変換より短い場合、エラーが大きくなる

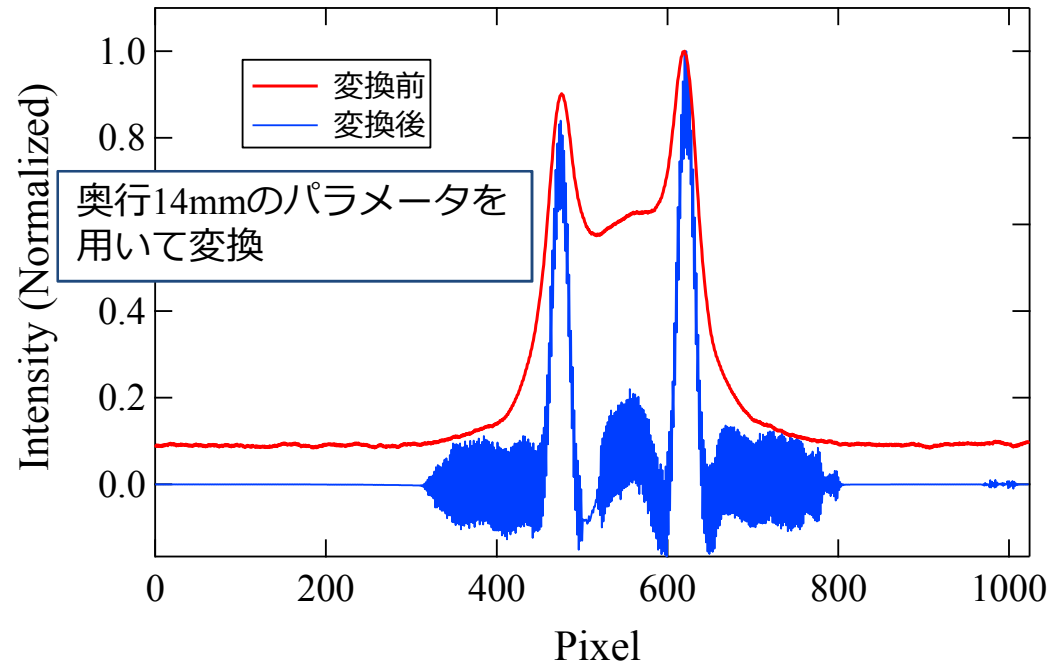
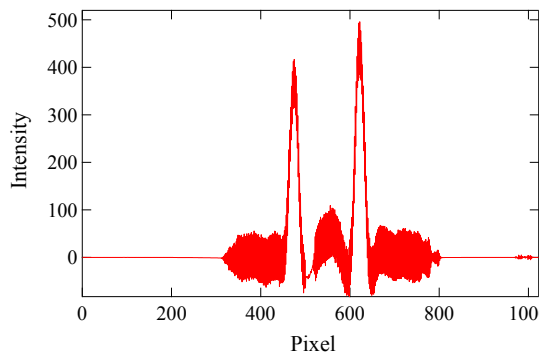
画像のバックグラウンドの影響を取り除いて変換を行った



- スムージング
- バックグラウンドを引いて一定値以下をカットオフ



逆変換



変換前後の比較

逆変換処理によって元画像よりシャープな信号を得ることに成功した

様々なパラメータと画像の組み合わせで変換を行ったが现阶段ではプラズマの奥行の推定には至っていない

MHCD プラズマの分光計測における空間分解能の向上を目指し  
レイトレーシング解析を用いた画像処理法の構築を行った

## 結果

- ✓ 光源が空間的な拡がりを持つことに起因する像のボケはDouble Exponentialによって精度よく近似することが可能
- ✓ 逆変換画像処理を行うことで取得画像からシャープな信号を取り出すことに成功
- ✓ 詳細な発光領域の推定、空間分解能の向上には至っていない

## 今後の方針

- ✓ より多くの変換パターンを検証することで変換結果の傾向をつかむ
- ✓ シミュレーションと実際の装置構成のズレが小さくなるよう設定および配置の見直しを行う