

### 疑似逆行列を用いた縦断層イメージングに関する研究

河部, 正裕 / KAWABE, Masahiro

---

(発行年 / Year)

2012-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2012-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

P397.5

M34

2011-11

平成23年度 (2011)

修士論文

疑似逆行列を用いた  
縦断層イメージングに関する研究

Longitudinal imaging with a pseudo inverse matrix

指導教授

尾川 浩一 教授

法政大学大学院 工学研究科 情報電子工学専攻

10R4114 河部 正裕





# 目次

Abstract	1
第1章 はじめに	3
第2章 提案手法	4
2.1 2次元における縦断層イメージング	4
2.1.1 投影手法	4
2.1.2 疑似逆行列を用いた再構成手法	5
2.2 3次元における縦断層イメージング	7
2.2.1 投影手法	7
2.2.2 疑似逆行列を用いた再構成手法	8
第3章 シミュレーション	10
3.1 2次元シミュレーション	10
3.2 3次元シミュレーション	13
3.3 パラメータを変化させた3次元シミュレーション	20
3.3.1 検出器数を変化させたシミュレーション	20
3.3.2 コリメータ数を変化させたシミュレーション	27
3.3.3 $z_0$ の値を変化させたシミュレーション	33
3.3.4 $z$ の値を変化させたシミュレーション	39
3.4 点ファントムにおける FWHM の計測	45
3.4.1 $xy$ 平面における FWHM	45
3.4.2 $zx$ 平面における FWHM	55
3.5 提案手法とピンホールバックプロジェクションとの比較	65
第4章 考察	66
4.1 再構成結果に対する考察	66
4.2 パラメータの変化に対する考察	66
4.3 点ファントムにおける FWHM に対する考察	67
4.4 点ファントムにおけるスライドナンバーの変化に対する考察	68
4.5 ピンホールバックプロジェクションとの比較に対する考察	68
第5章 まとめ	69
謝辞	70
参考文献	71

# Abstract

In a conventional x-ray CT, an x-ray tube and detectors rotate around an object to acquire projection data, and cross-sectional images are reconstructed with these projection data. On the other hand, there is a situation in which projection data cannot be acquired with a rotating detector geometry. In this case we acquire projection data in a restricted angular region, and reconstruct cross-sectional images with a dedicated algorithm such as a tomosynthesis technique. This paper proposes a new method that reconstructs cross-sectional images of an object with a pseudo inverse matrix. In this method projection data are acquired with a pinhole collimator by changing the location of the pinhole. The validity of our proposed method was confirmed with the results of simulations.

# 第1章 はじめに

CT(Computed Tomography)とは放射線を用いて被検体内部の断層面を非侵襲で映像化できる技術のことである。通常、CTは被検体の周りを360度回転走査することでデータを収集する。しかし、検出器を360度回転してデータ収集できない状況においては特定方向の空間周波数が欠落し、精度の高い画像を得ることができないという欠点がある。本論文では、このような状況における縦断層イメージングを取り扱うとともに、疑似逆行列を用いて解析的に画像を再構成する手法を提案する。縦断層イメージングを用いるこの種の手法は従来より、トモシンセシスを用いる方法 [1][2] や、符号化開口を用いて再構成する手法 [3] などが提案されている。この様な問題に対して、行列演算を用いて2次元物体を再構成する試みも行われている [4]。本研究では文献 [4] で提案された手法を3次元物体の映像化に拡張して、さらに拘束条件を与えずに再構成することに成功したのでこれについて報告する。

縦断層イメージングとは患者の体軸に平行な方向の断層面を得るために、断層面と平行な被検体の前方に検出器を静止させ、ピンホールコリメータの孔の位置を順次変えながら2次元のデータ収集を行うものである。この方法の模式図を Fig.1.1 に示す。

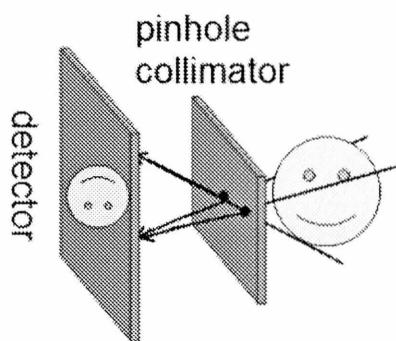


Fig. 1.1: 縦断層イメージング

この縦断層イメージングには検出器を被検体の周りで回転させなくて良いという利点がある。しかし、360度の投影方向からデータを再構成する従来のCTの再構成法と比べて、特定方向の空間周波数が不完全となり画像が劣化してしまうという欠点もある。本研究ではこの欠点を補うための手法である疑似逆行列を用いたアルゴリズムを提案し、その有用性と限界を検証することを目的とする。本論文では、第2章で縦断層イメージングの理論を述べ、第3章でシミュレーション結果を示し、第4章で考察を行う。

## 第2章 提案手法

### 2.1 2次元における縦断層イメージング

提案する縦断層イメージングの手法を用いて2次元画像を再構成する方法を以下に示す.

#### 2.1.1 投影手法

2次元の物体を縦断層で投影するにあたり, 以下の Fig.2.1 のようなモデルを考える.

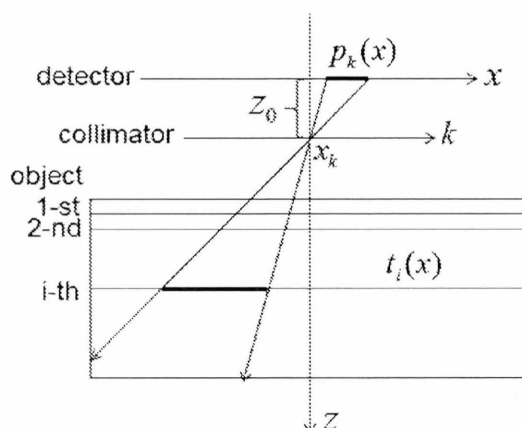


Fig. 2.1: 2次元縦断層イメージングのモデル

ここで  $p_k(x)$  はピンホールに対する投影データ,  $x$  軸は検出器の座標,  $x_k$  は  $k$  番目のピンホールの  $x$  での位置,  $z$  軸はオブジェクトの深さ方向の座標,  $t_{zi}(x)$  は層  $z$  での位置  $x$  における RI 分布,  $z_0$  は検出器とピンホールの距離とする. このモデルにおいて,  $k$  番目のピンホールに対する投影データは以下の (2.1) 式のように表される.

$$p_k(x) = \sum_{i=1}^m \frac{z_0}{z_i} \cdot t_{zi} \left( (x_k - x) \cdot \frac{z_i}{z_0} + x_k \right) \quad (2.1)$$

(2.1) 式を各検出器, ピンホールの位置に当てはめることで投影データを求めることができる.

## 2.1.2 疑似逆行列を用いた再構成手法

最初に、(2.1)式のままでは複雑なので $t_{zi}(x)$ を $z$ を用いないで表わせるように正規化する。正規化は $x_k = 0$ における分布の表現を用いることで行われる。すなわち、

$$t_i(x) = \frac{z_0}{z_i} \cdot t_{zi}\left(-\frac{z_i}{z_0} \cdot x\right) \quad (2.2)$$

となる。この(2.2)式を用いて(2.1)式の $t_{zi}$ の項の正規化を行う。その結果を以下の(2.3)式に示す。

$$p_k(x) = \sum_{i=1}^m t_i\left(x - x_k \cdot \frac{z_0 + z_i}{z_0}\right) \quad (2.3)$$

ここで、記録された投影データから数学的に元のRI分布を求める方法について述べる。(2.3)式は次の(2.4)式のように変換することができる。

$$p_k(x) = \sum_{i=1}^m h_{ki}(x) * t_i(x) \quad (2.4)$$

ここで $h_{ki}(x)$ は次の様に表わすことができる。

$$h_{ki}(x) = \delta\left(x - x_k \cdot \frac{z_0 + z_i}{z_i}\right) \quad (2.5)$$

(2.5)式は $\delta$ 関数とのコンボリューションにより、求めたい $t_{zi}(x)$ を抽出することができることを意味している。しかも $h_{ki}(x)$ は $t$ を使わない関数なので $t$ を知ることなく $t$ を求めることができる。次に、このコンボリューションを解くため両辺をフーリエ変換する。結果は以下の(2.6)式のようになる。

$$P_k(\omega) = \sum_{i=1}^m H_{ki}(\omega) T_i(\omega) \quad (2.6)$$

また、(2.5)式をフーリエ変換すると以下の(2.7)式のようになる。

$$H_{ki}(\omega) = \exp\left(-j\omega x_k \cdot \frac{z_0 + z_i}{z_i}\right) \quad (2.7)$$

また、フーリエ変換後の式に $\Sigma$ 記号があるのは計算しづらいため、行列の記述で以下の(2.8)式のように記述する。

$$P = H \cdot T \quad (2.8)$$

上式より、以下の(2.9)式が導かれる。

$$T = H^{-1} \cdot P \quad (2.9)$$

この(2.9)式の逆フーリエ変換を求めることで元の $t_i(x)$ を求めることができる。以上のこと

から  $H$  の逆行列を求めることで解を得ることができるといことがわかる。ここで、 $H$  の行要素と列要素はそれぞれ被検体の深さとピンホール数である。一般に、逆行列は行と列の要素の数が等しい正方行列で固有値が 0 でないものにしか存在しない。しかし、今回考慮する 2 つの要素はそれぞれ独立の要素として別々の数で与えられるのが普通である。そのことから行と列の要素数が異なっても疑似的に逆行列を求める方法を用いて逆行列とする。すなわち、以下の (2.10) 式で与えられる目的関数  $J(x)$  を考え、

$$J(x) = \|Hx - b\|^2 \quad (2.10)$$

$J(x)$  を解くことができる  $H$  を  $H^+$  とすると、 $H^+$  は以下の (2.11) 式で表わすことができる。この (2.11) 式のことを疑似逆行列 (MP 一般逆行列 [5]) と呼ぶ。

$$H^+ = H^t(HH^t)^{-1} \quad (2.11)$$

しかし、この式だけではもし  $H$  が 0 の列を持つ固有値が 0 の行列だった場合、計算することができない。そのため、近似的に以下の (2.12) 式 (単純正則化一般逆行列) を用いることで計算を行う。

$$H^+ = H^t(HH^t + aI)^{-1} \quad (2.12)$$

ここでの  $a$  は  $H$  の固有値により決まる正則化パラメータであるが今回は実験的に値を決めている。



## 2.2 3次元における縦断層イメージング

以上の2次元における手法を3次元に拡張したものを以下に示す.

### 2.2.1 投影手法

3次元の物体を縦断層で投影するにあたり以下の Fig.2.2 のようなモデルを考える.

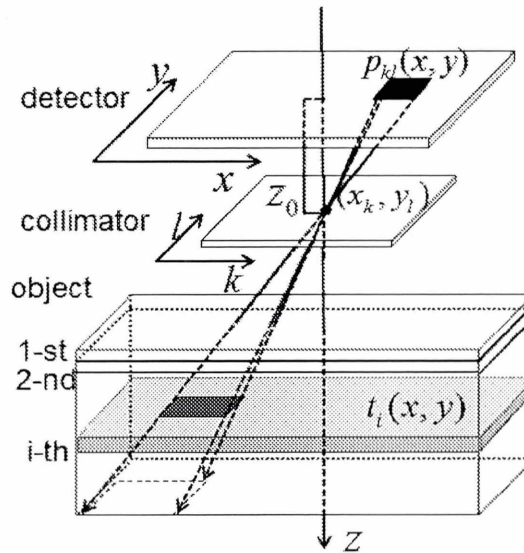


Fig. 2.2: 3次元縦断層イメージングのモデル

ここで  $p_{kl}(x, y)$  はピンホールに対する投影データ,  $x$  軸,  $y$  軸は検出器の座標,  $x_k$  は  $k$  番目のピンホールの  $x$  での位置,  $y_l$  は  $l$  番目のピンホールの  $y$  での位置,  $z$  軸はオブジェクトの深さ方向の座標,  $t_{zi}(x, y)$  は層  $z$  での位置  $(x, y)$  における RI 分布,  $z_0$  は検出器とピンホールの距離とする. このモデルにおいて,  $(k, l)$  番目のピンホールに対する投影データは以下の (2.13) 式のように表される.

$$p_{kl}(x, y) = \sum_{i=1}^m \frac{z_0}{z_i} \cdot t_{zi} \left( (x_k - x) \cdot \frac{z_i}{z_0} + x_k, (y_l - y) \cdot \frac{z_i}{z_0} + y_l \right) \quad (2.13)$$

(2.13) 式を各検出器, ピンホールの位置に当てはめることで投影データを求めることができる.



## 2.2.2 疑似逆行列を用いた再構成手法

2次元の場合を3次元に拡張し、式を変形していく。最初に、(2.13)式のままでは複雑なので  $t_{zi}(x, y)$  を  $z$  を用いないで表わせるように正規化する。正規化は  $x_k = 0, y_l = 0$  における分布の表現を用いることで行われる。すなわち、

$$t_i(x, y) = \frac{z_0}{z_i} \cdot t_{zi}\left(-\frac{z_i}{z_0} \cdot x, -\frac{z_i}{z_0} \cdot y\right) \quad (2.14)$$

となる。この(2.14)式を用いて(2.13)式の  $t_{zi}$  の項の正規化を行う。その結果を以下の(2.15)式に示す。

$$p_{kl}(x, y) = \sum_{i=1}^m t_i\left(x - x_k \cdot \frac{z_0 + z_i}{z_0}, y - y_l \cdot \frac{z_0 + z_i}{z_0}\right) \quad (2.15)$$

ここで、記録された投影データから数学的に元のRI分布を求める方法について述べる。(2.15)式は次の(2.16)式のように変換することができる。

$$p_{kl}(x, y) = \sum_{i=1}^m h_{kli}(x, y) * t_i(x, y) \quad (2.16)$$

ここで  $h_{kli}(x, y)$  は次の様に表わすことができる。

$$h_{kli}(x, y) = \delta\left(x - x_k \cdot \frac{z_0 + z_i}{z_i}, y - y_l \cdot \frac{z_0 + z_i}{z_i}\right) \quad (2.17)$$

(2.17)式は  $\delta$  関数とのコンボリューションにより、求めたい  $t_{zi}(x, y)$  を抽出することができることを意味している。しかも  $h_{kli}(x, y)$  は  $t$  を使わない関数なので  $t$  を知ることなく  $t$  を求めることができる。次に、このコンボリューションを解くため両辺をフーリエ変換する。結果は以下の(2.18)式のようになる。

$$P_{kl}(\omega, \xi) = \sum_{i=1}^m H_{kli}(\omega, \xi) T_i(\omega, \xi) \quad (2.18)$$

また、(2.17)式をフーリエ変換すると以下の(2.19)式のようになる。

$$H_{kli}(\omega, \xi) = \exp(-j\omega x_k \cdot \frac{z_0 + z_i}{z_i}) \cdot \exp(-j\xi y_l \cdot \frac{z_0 + z_i}{z_i}) \quad (2.19)$$

$H_{kli}(\omega, \xi)$  は5次元となっているので以下の(2.20)式のように分解する。

$$H_{kli}(\omega, \xi) = H_{ki}(\omega) \cdot H_{li}(\xi) \quad (2.20)$$

また、フーリエ変換後の式に  $\Sigma$  記号があるのは計算しづらいため、行列の記述で以下の(2.21)式のように記述する。

$$P = H \cdot T \quad (2.21)$$

上式より, 以下の (2.22) 式が導かれる.

$$T = H^{-1} \cdot P \quad (2.22)$$

この (2.22) 式の逆フーリエ変換を求めることで元の  $t_i(x)$  を求めることができる. 以上のことから  $H$  の逆行列を求めることで解を得ることができるということがわかる. ここで,  $H$  は 2次元の場合と同様に行要素と列要素が異なる. そこで同様に行と列の要素数が異なっても疑似的に逆行列を求める方法を用いて逆行列とする. 疑似逆行列は 2次元の場合と同様単純正則化一般逆行列である以下の (2.23) 式を用いて計算を行う.

$$H^+ = H^t(HH^t + aI)^{-1} \quad (2.23)$$

ここでの  $a$  は  $H$  の固有値により決まる正則化パラメータであるが今回は実験的に値を決めている.

# 第3章 シミュレーション

## 3.1 2次元シミュレーション

第2章で述べた方法で2次元シミュレーションを行った。以下の Fig.3.1~3.3 に用いた原画像とプロファイルを、Table 3.1 にシミュレーション条件を示す。

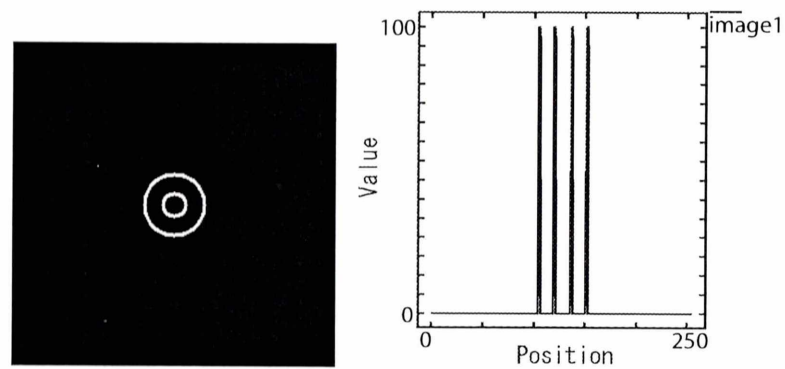


Fig. 3.1: 原画像1とプロファイル

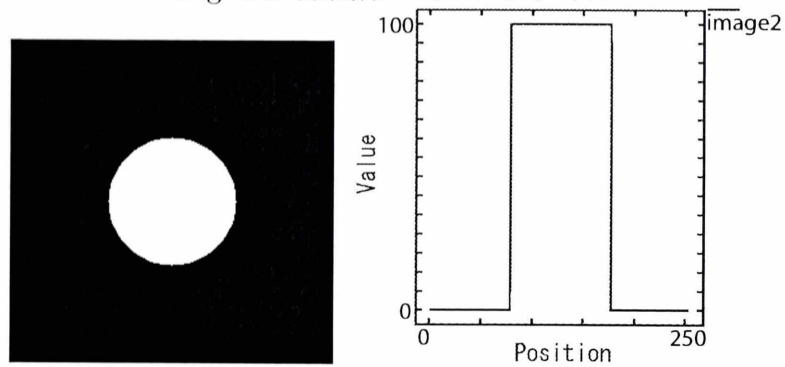


Fig. 3.2: 原画像2とプロファイル

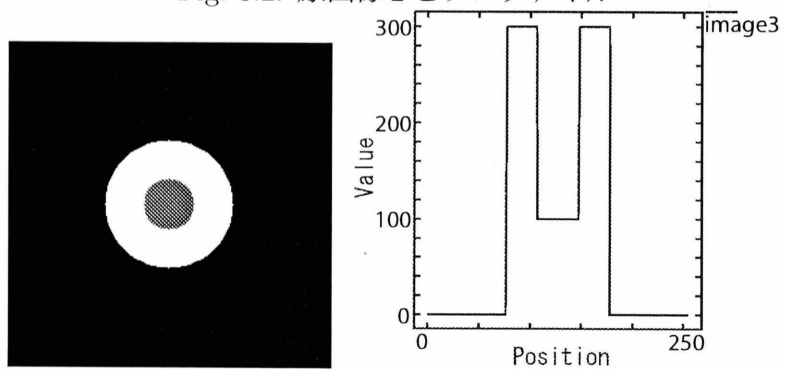


Fig. 3.3: 原画像3とプロファイル

Table 3.1: シミュレーション条件

オブジェクトサイズ	256 × 256
個々の検出器幅	1.0
全体の検出器幅	256
コリメータ間隔	1.0
全体のコリメータ幅	18
$z_0$	7.0
$a$	10000

また, この条件のジオメトリを以下の Fig.3.4 に示す.

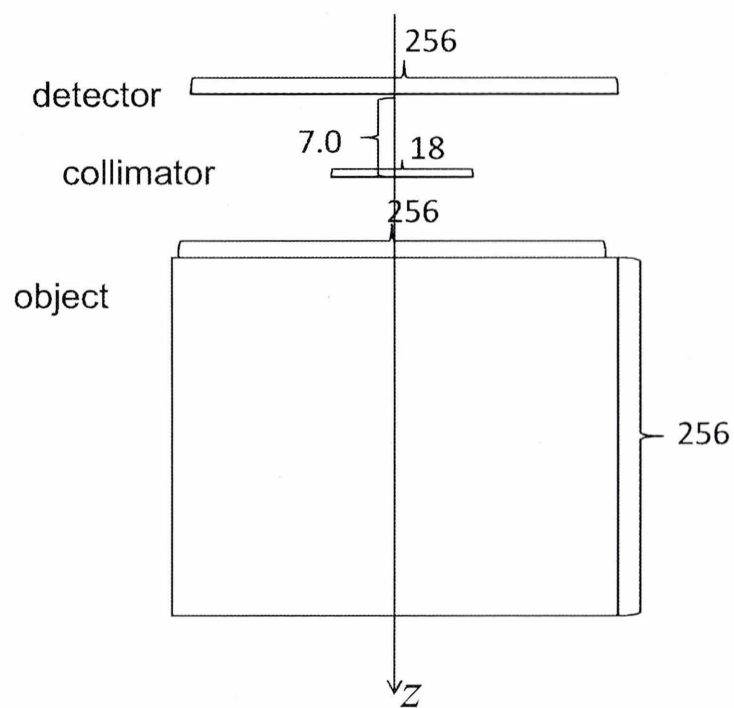


Fig. 3.4: ジオメトリ

シミュレーション結果と原画像と比較したプロファイルを以下の Fig3.5~3.7 に示す。プロファイルは再構成後の画像の原画像に相当する位置で切っており、縦軸は原画像の最大値で正規化している。

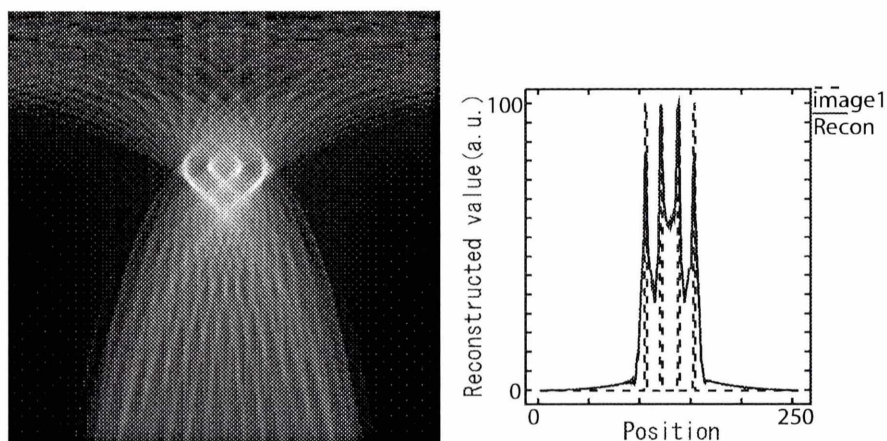


Fig. 3.5: 原画像 1 を用いた結果画像とプロファイル

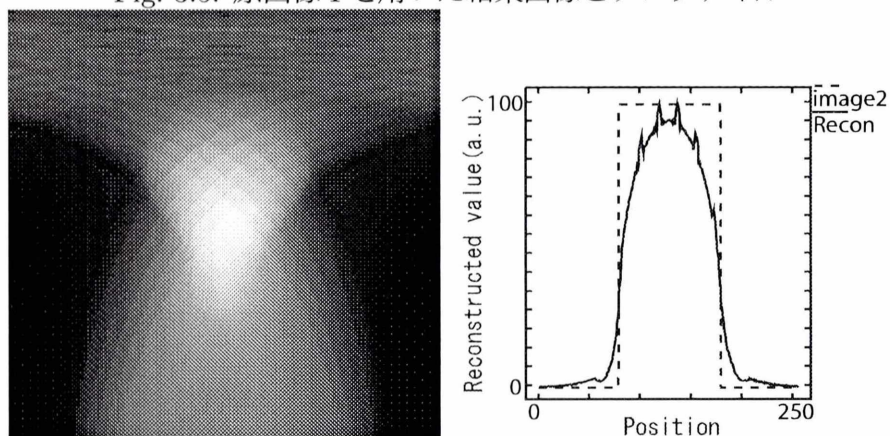


Fig. 3.6: 原画像 2 を用いた結果画像とプロファイル

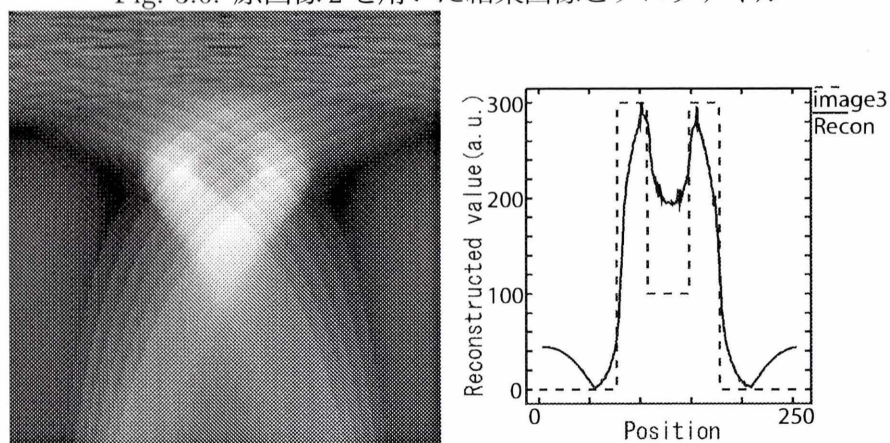


Fig. 3.7: 原画像 3 を用いた結果画像とプロファイル

### 3.2 3次元シミュレーション

また、同様に3次元シミュレーションを行った。以下のFig.3.8~3.16に用いた原画像とプロフィールを、Table 3.2にシミュレーション条件を示す。

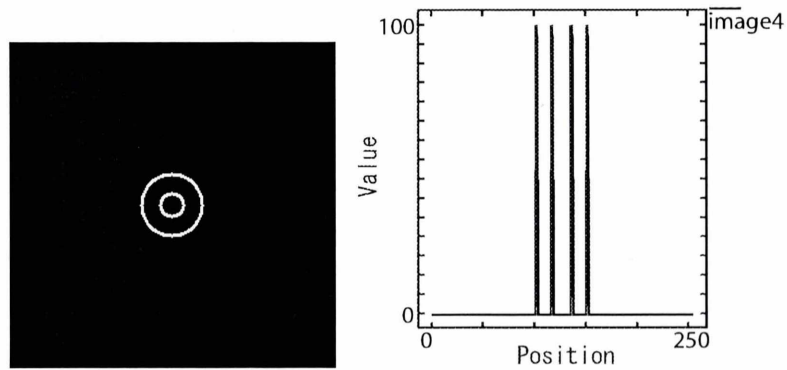


Fig. 3.8: 原画像 4 # 128 とプロフィール

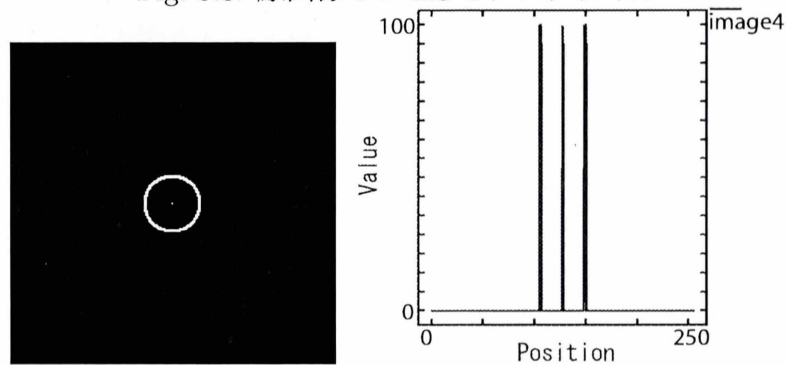


Fig. 3.9: 原画像 4 # 118 とプロフィール

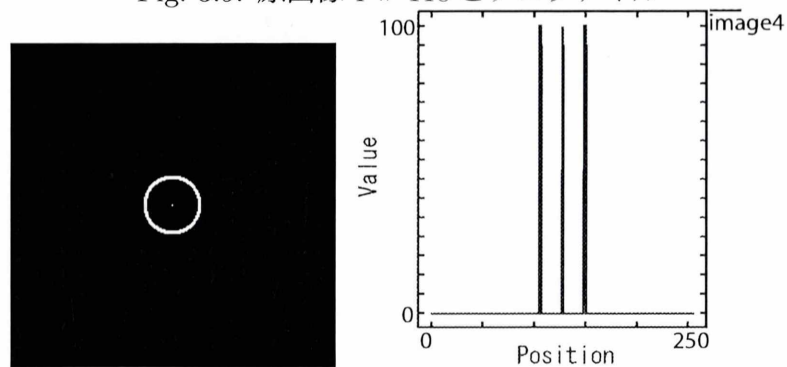


Fig. 3.10: 原画像 4 # 138 とプロフィール



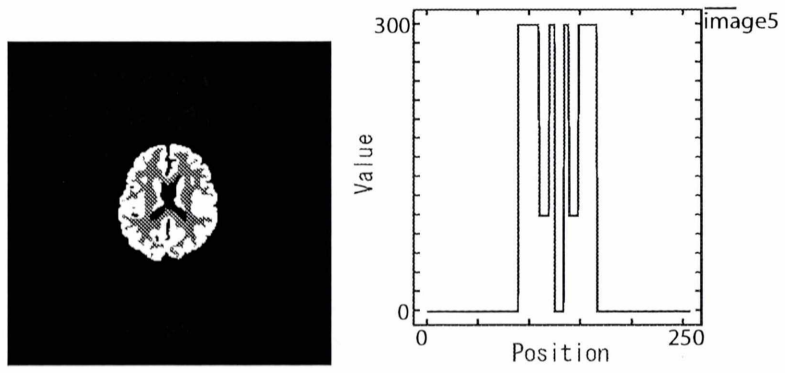


Fig. 3.11: 原画像 5 # 128 とプロファイル

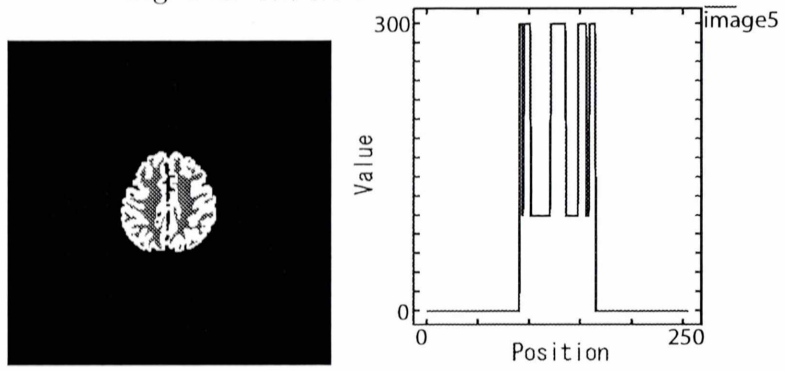


Fig. 3.12: 原画像 5 # 118 とプロファイル

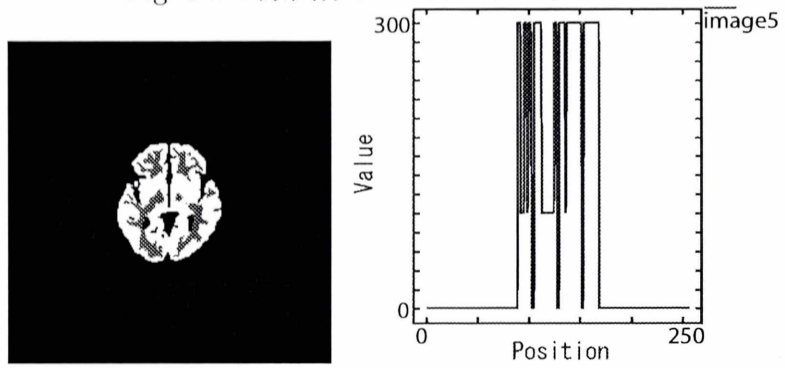


Fig. 3.13: 原画像 5 # 138 とプロファイル

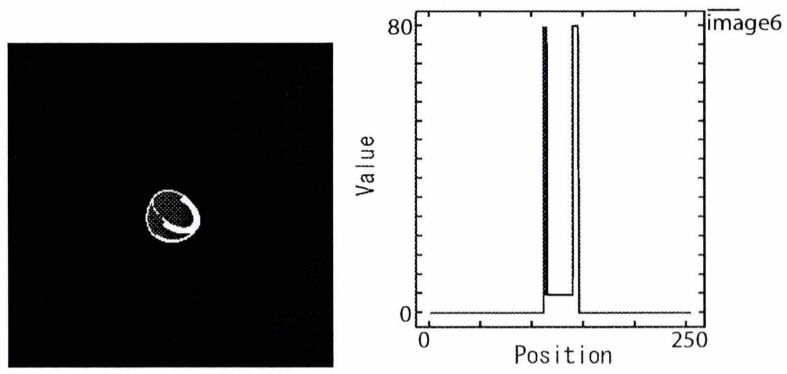


Fig. 3.14: 原画像 6 # 128 とプロファイル

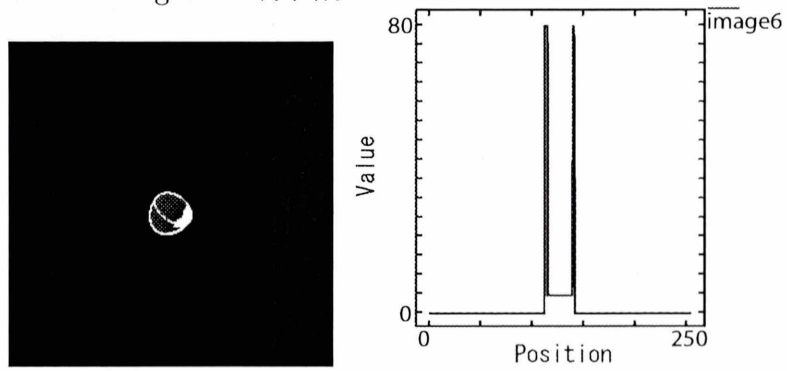


Fig. 3.15: 原画像 6 # 118 とプロファイル

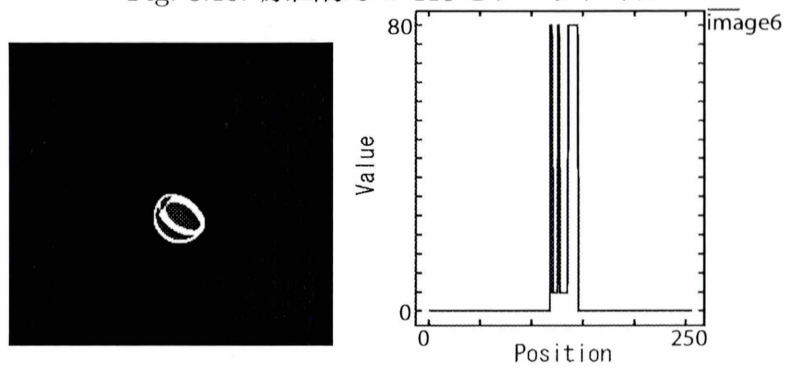


Fig. 3.16: 原画像 6 # 138 とプロファイル



Table 3.2: シミュレーション条件

オブジェクトサイズ	$256 \times 256 \times 256$
個々の検出器幅	$1.0 \times 1.0$
全体の検出器幅	$256 \times 256$
コリメータ間隔	$1.0 \times 1.0$
全体のコリメータ幅	$18 \times 18$
$z_0$	7.0
$a$	10000

また、この条件のジオメトリを以下の Fig.3.17 に示す。

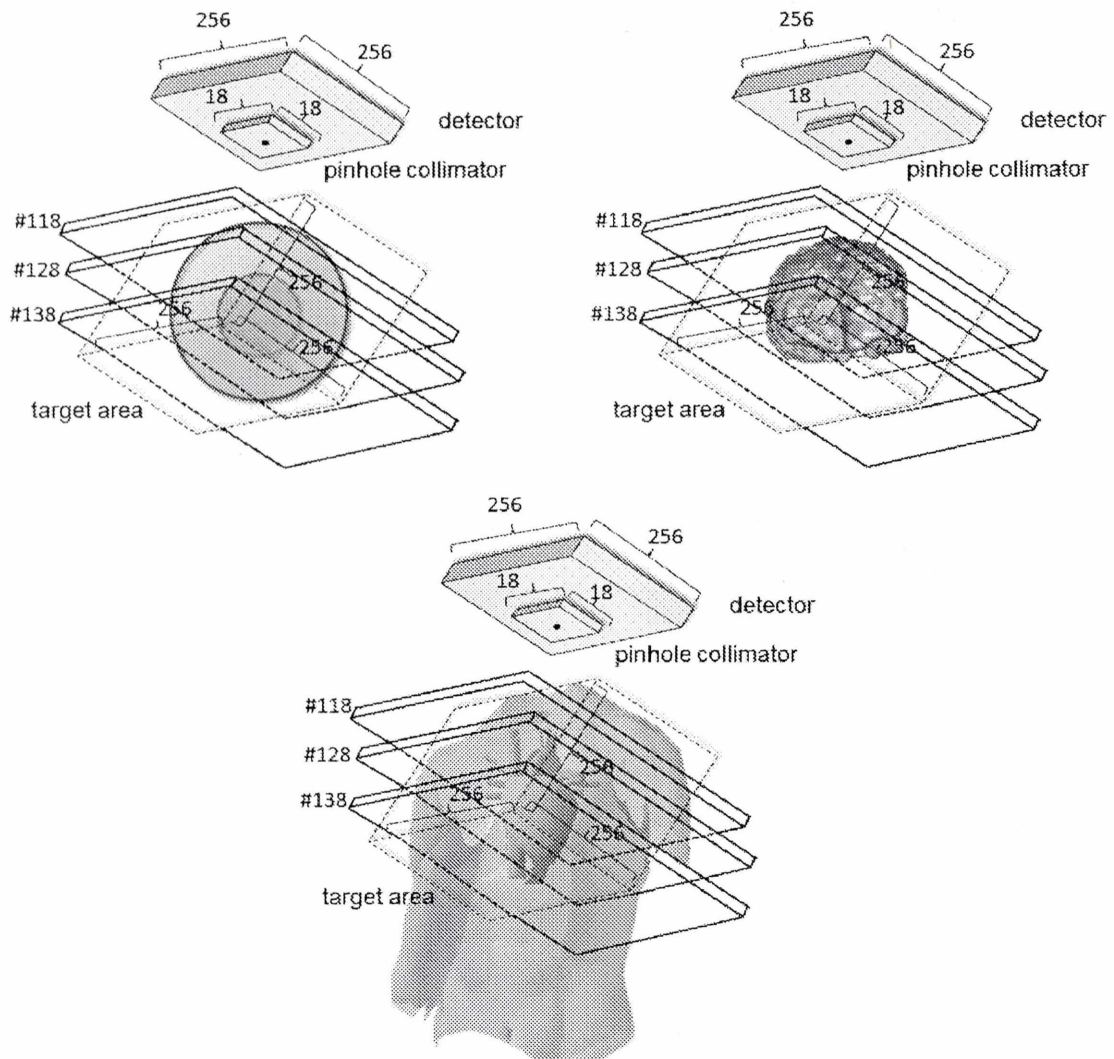


Fig. 3.17: ジオメトリ (上左:原画像4, 上右:原画像5, 下:原画像6)

シミュレーション結果とプロフィールを以下の Fig3.18~3.26 に示す。プロフィールは再構成後の画像の原画像に相当する位置で切っており、縦軸は原画像の最大値で正規化している。

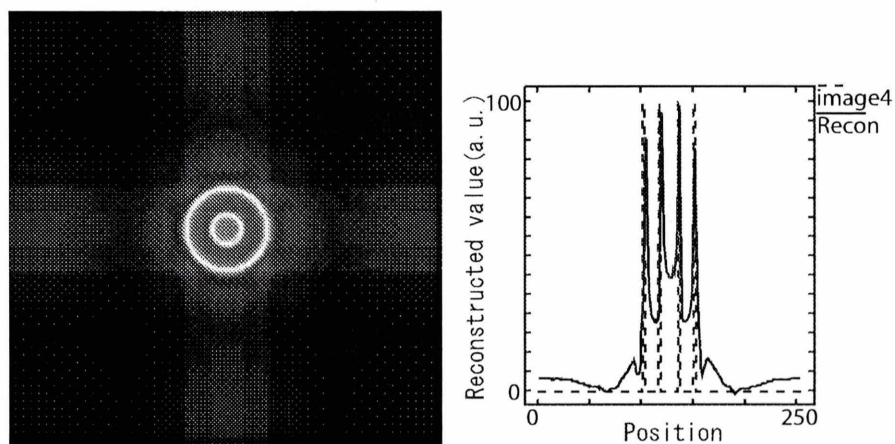


Fig. 3.18: 原画像 4 # 128 を用いた結果画像とプロフィール

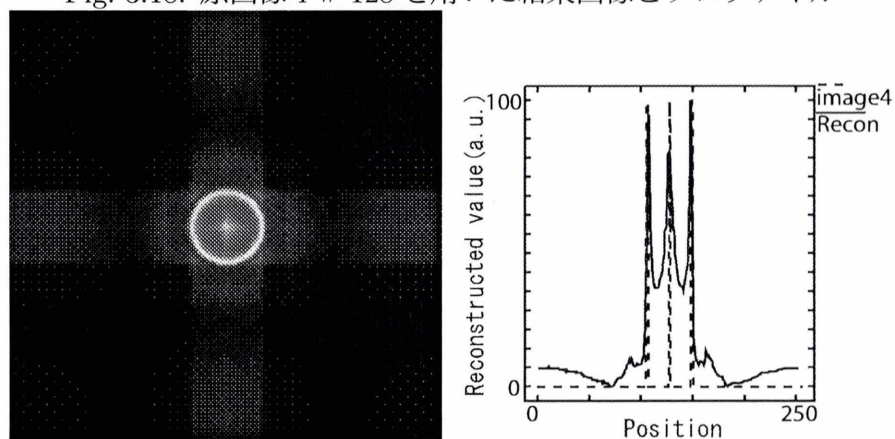


Fig. 3.19: 原画像 4 # 118 を用いた結果画像とプロフィール

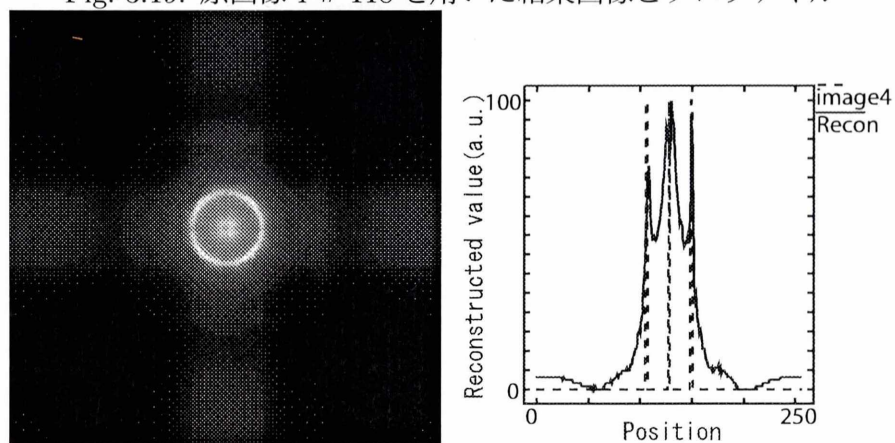


Fig. 3.20: 原画像 4 # 138 を用いた結果画像とプロフィール

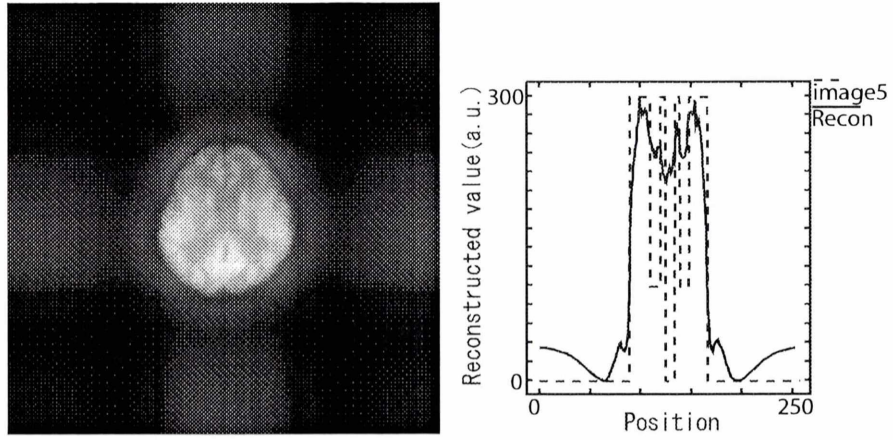


Fig. 3.21: 原画像 5 # 128 を用いた結果画像とプロファイル

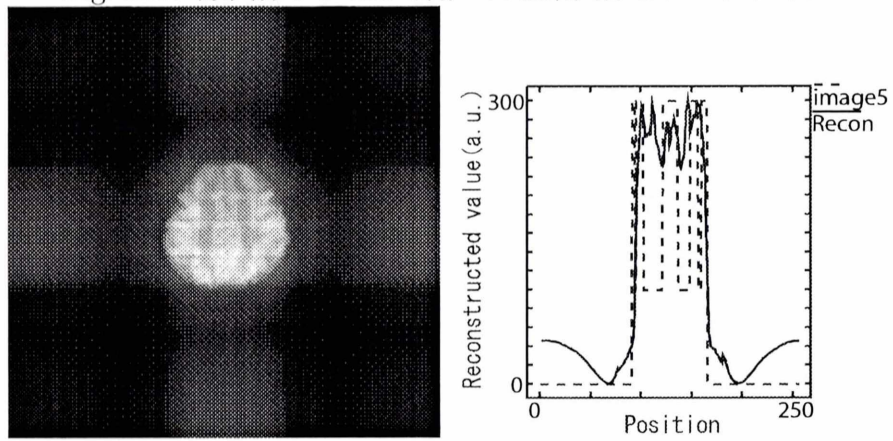


Fig. 3.22: 原画像 5 # 118 を用いた結果画像とプロファイル

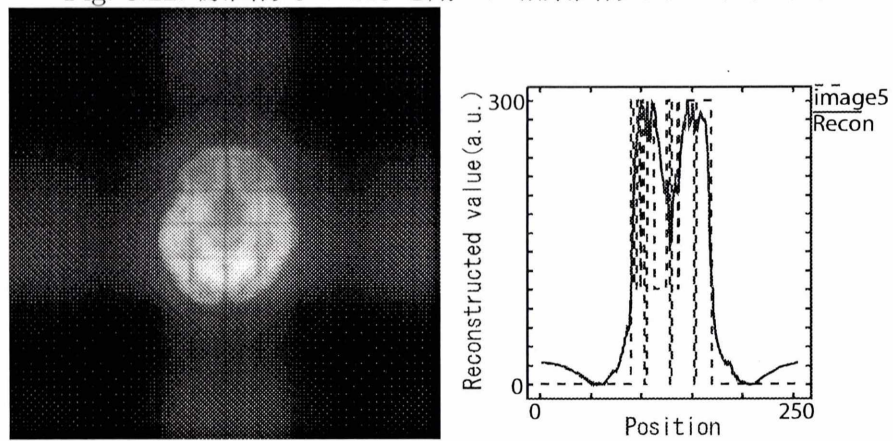


Fig. 3.23: 原画像 5 # 138 を用いた結果画像とプロファイル



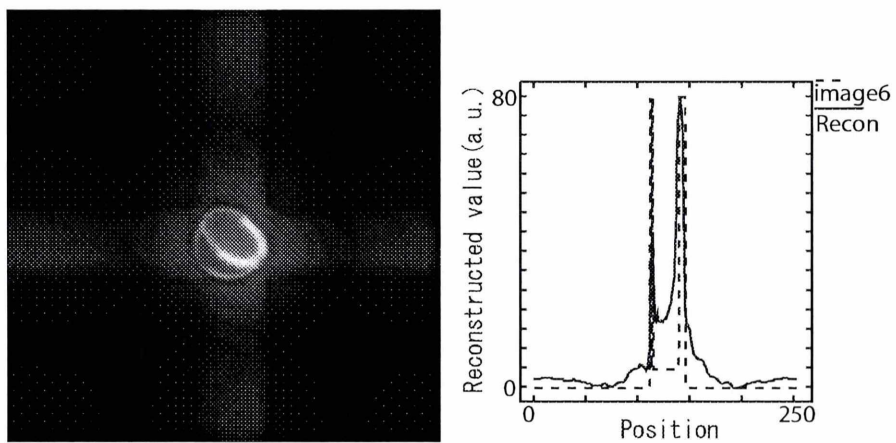


Fig. 3.24: 原画像 6 # 128 を用いた結果画像とプロフィール

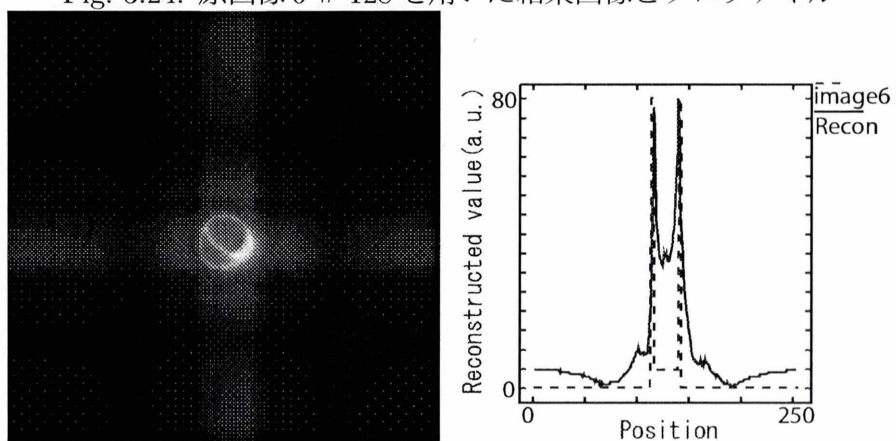


Fig. 3.25: 原画像 6 # 118 を用いた結果画像とプロフィール

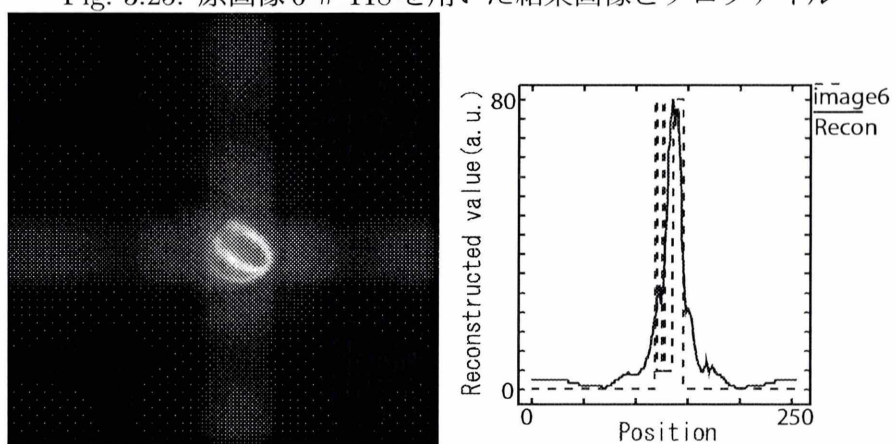


Fig. 3.26: 原画像 6 # 138 を用いた結果画像とプロフィール

### 3.3 パラメータを変化させた3次元シミュレーション

原画像 4~6 を用いて様々なパラメータを変化させた結果を次に示す.

#### 3.3.1 検出器数を変化させたシミュレーション

検出器数を  $294 \times 294$ ,  $320 \times 320$  に増加させた結果を以下の Fig.3.27~44 に示す. 検出器数は基準に設定したパラメータより小さくしてしまうと  $z$  の値より小さくなってしまいうため, 再構成ができない. そのため, パラメータの変化は増加のみとした.

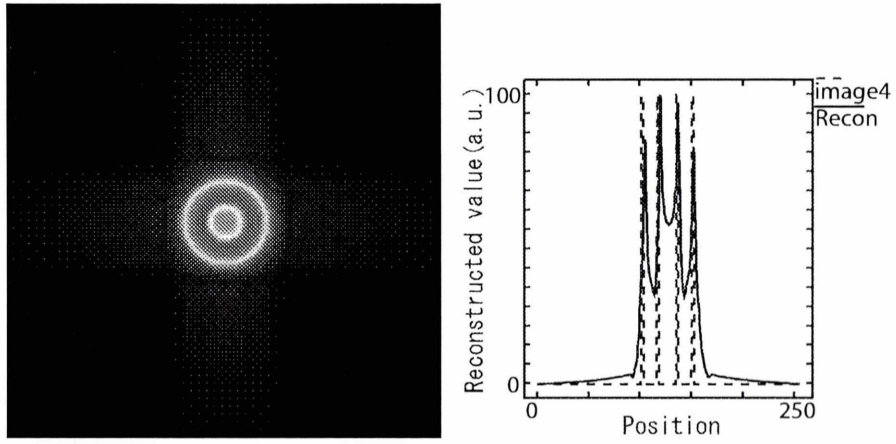


Fig. 3.27: 原画像 4 # 128 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $294 \times 294$ )

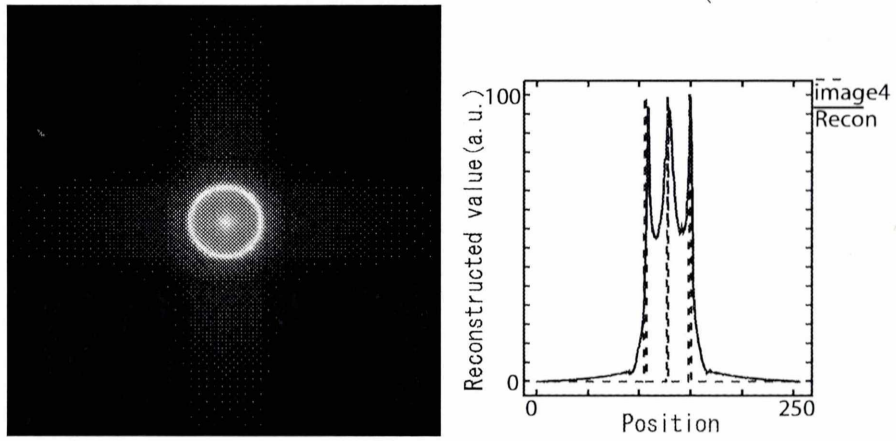


Fig. 3.28: 原画像 4 # 118 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $294 \times 294$ )

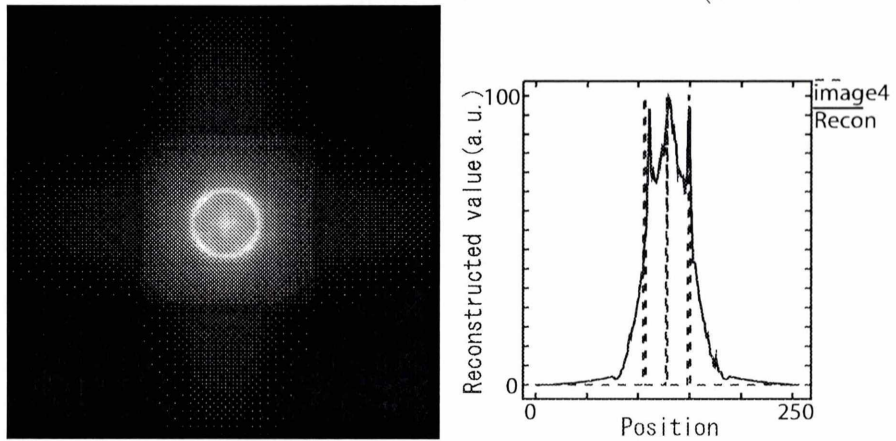


Fig. 3.29: 原画像 4 # 138 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $294 \times 294$ )

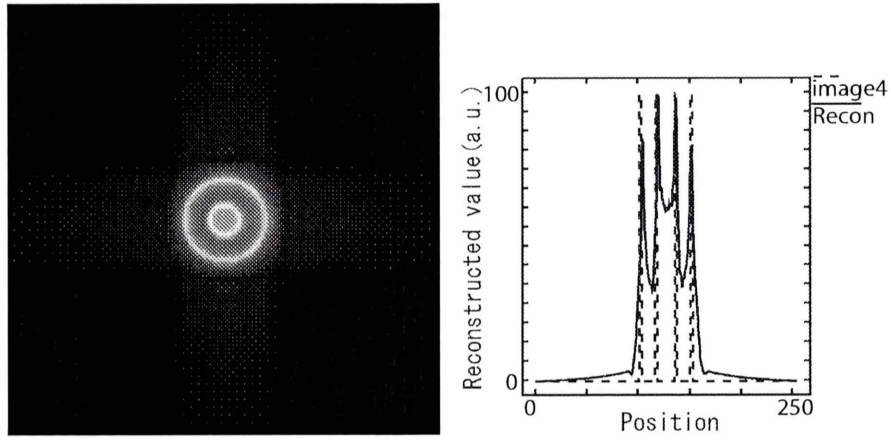


Fig. 3.30: 原画像 4 # 128 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $320 \times 320$ )

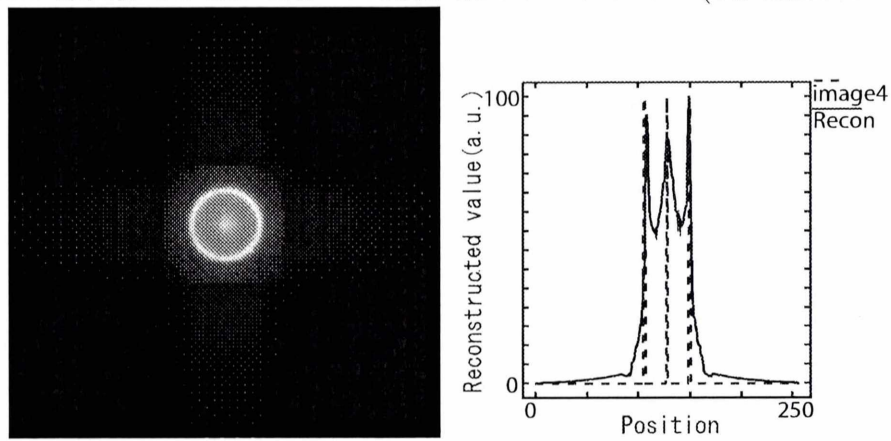


Fig. 3.31: 原画像 4 # 118 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $320 \times 320$ )

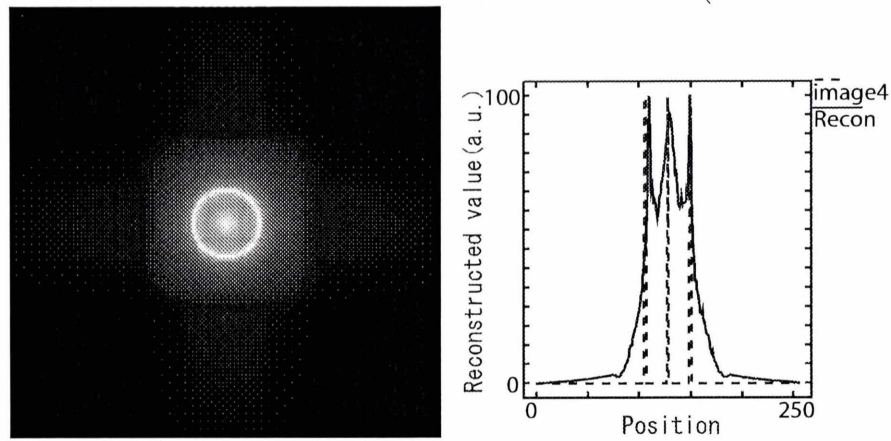


Fig. 3.32: 原画像 4 # 138 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $320 \times 320$ )

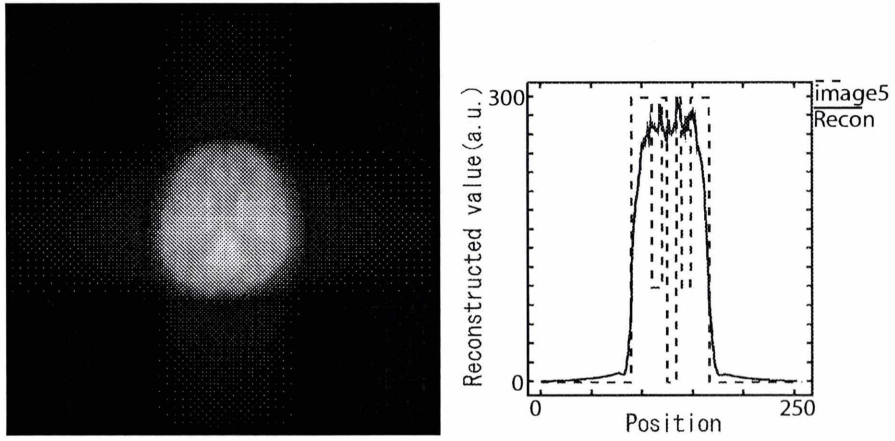


Fig. 3.33: 原画像 5 # 128 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $294 \times 294$ )

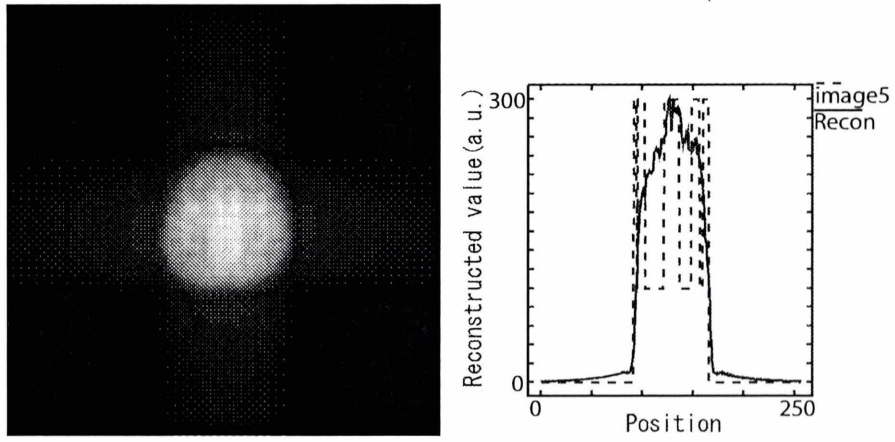


Fig. 3.34: 原画像 5 # 118 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $294 \times 294$ )

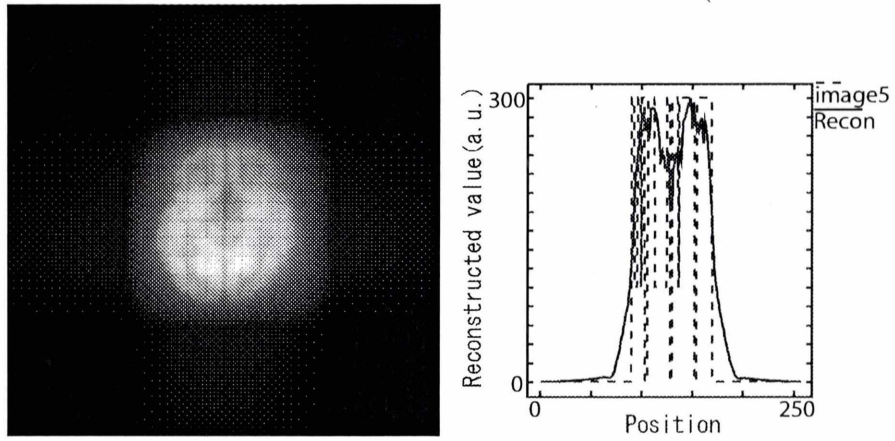


Fig. 3.35: 原画像 5 # 138 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $294 \times 294$ )



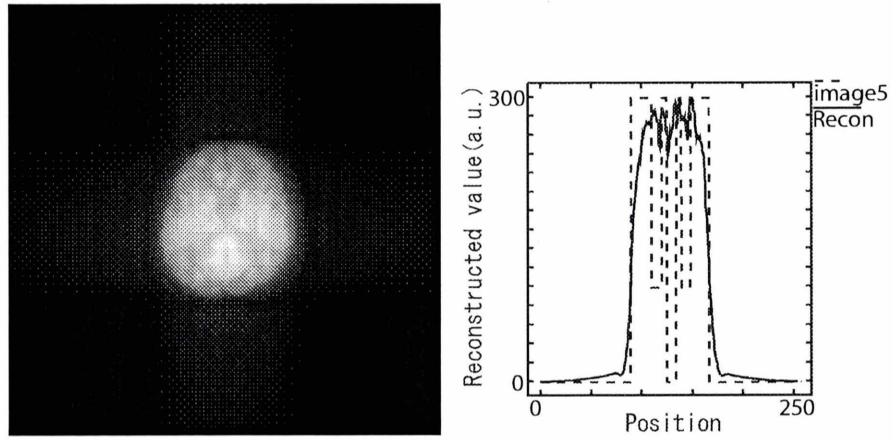


Fig. 3.36: 原画像 5 # 128 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $320 \times 320$ )

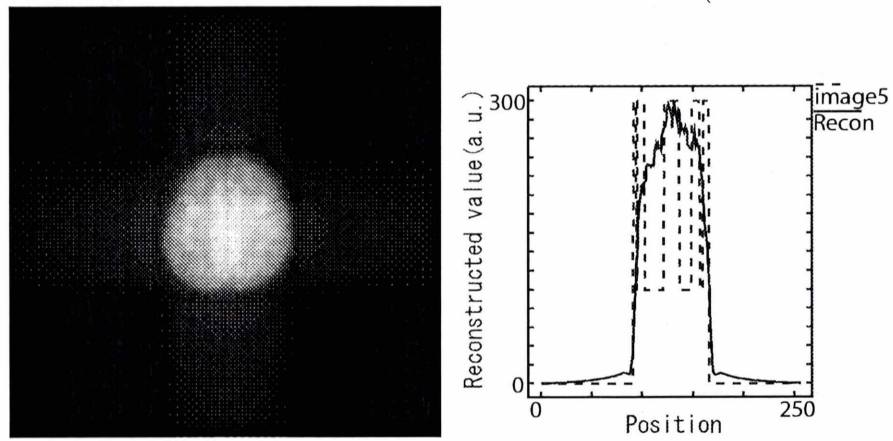


Fig. 3.37: 原画像 5 # 118 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $320 \times 320$ )

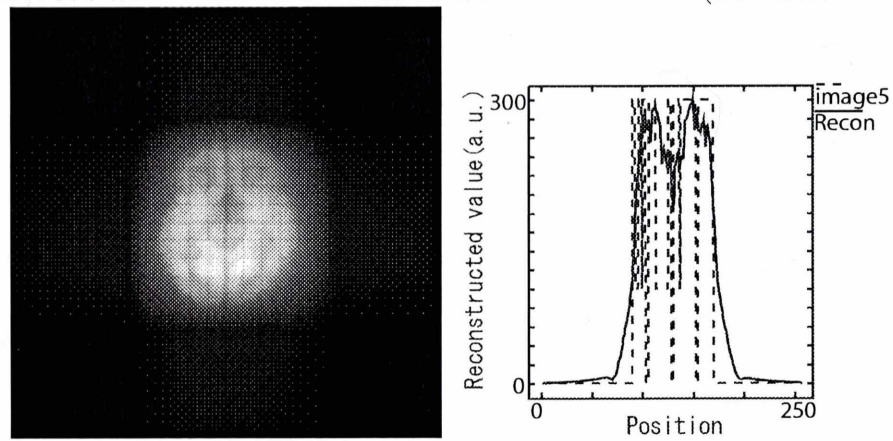


Fig. 3.38: 原画像 5 # 138 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $320 \times 320$ )

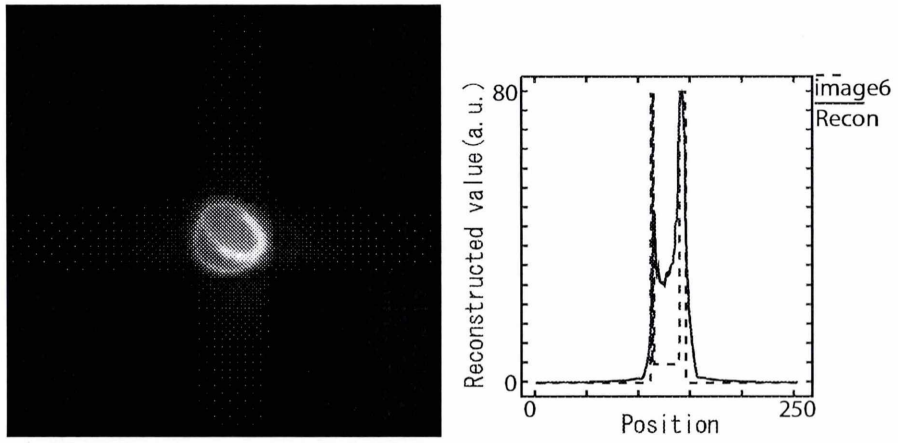


Fig. 3.39: 原画像 6 # 128 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $294 \times 294$ )

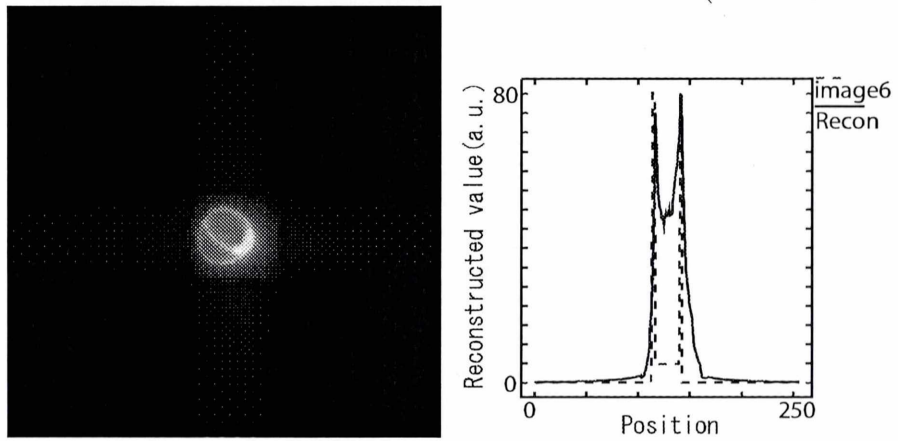


Fig. 3.40: 原画像 6 # 118 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $294 \times 294$ )

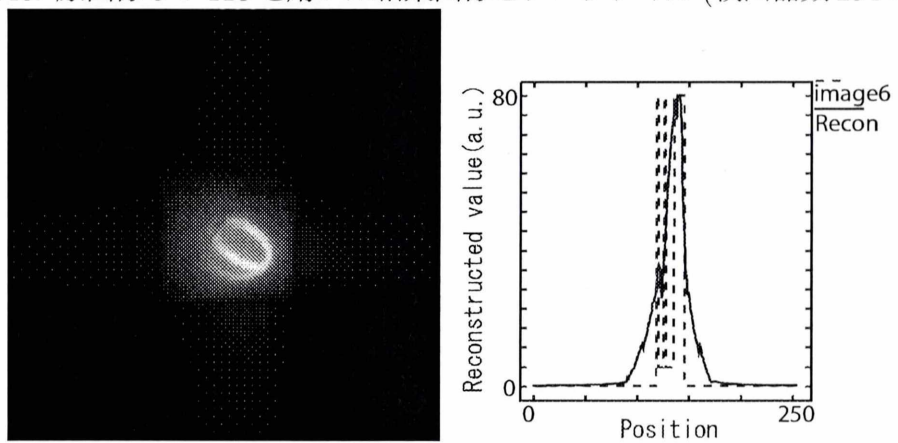


Fig. 3.41: 原画像 6 # 138 を用いた結果画像とプロフィール (検出器数  $294 \times 294$ )

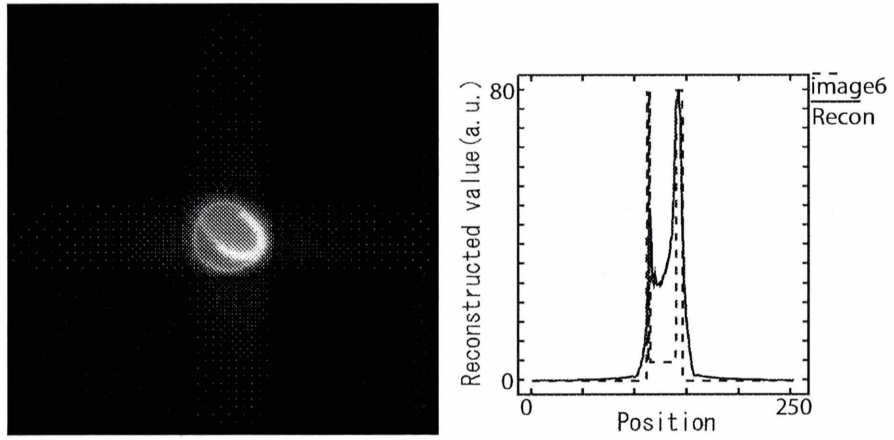


Fig. 3.42: 原画像 6 # 128 を用いた結果画像とプロファイル (検出器数  $320 \times 320$ )

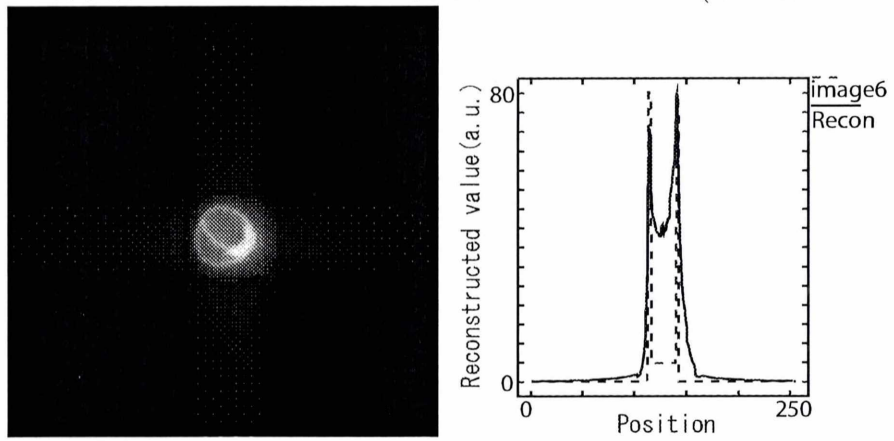


Fig. 3.43: 原画像 6 # 118 を用いた結果画像とプロファイル (検出器数  $320 \times 320$ )

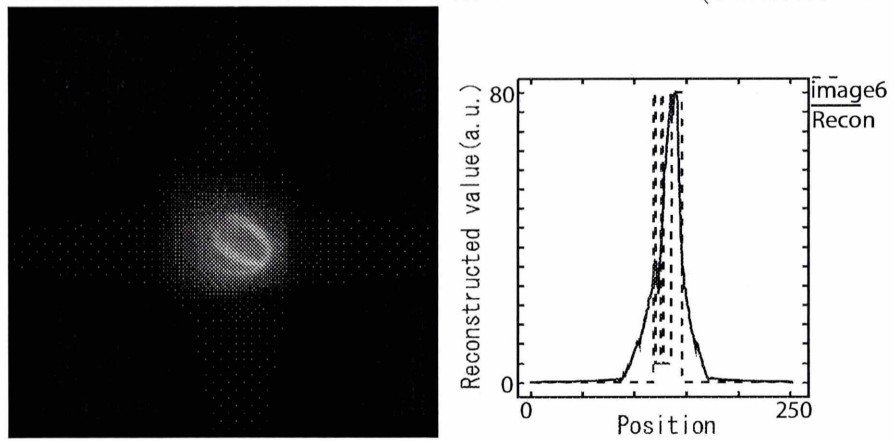


Fig. 3.44: 原画像 6 # 138 を用いた結果画像とプロファイル (検出器数  $320 \times 320$ )

### 3.3.2 コリメータ数を変化させたシミュレーション

コリメータ数を  $10 \times 10$ ,  $30 \times 30$  に変化させた結果を以下の Fig.3.45~62 に示す。

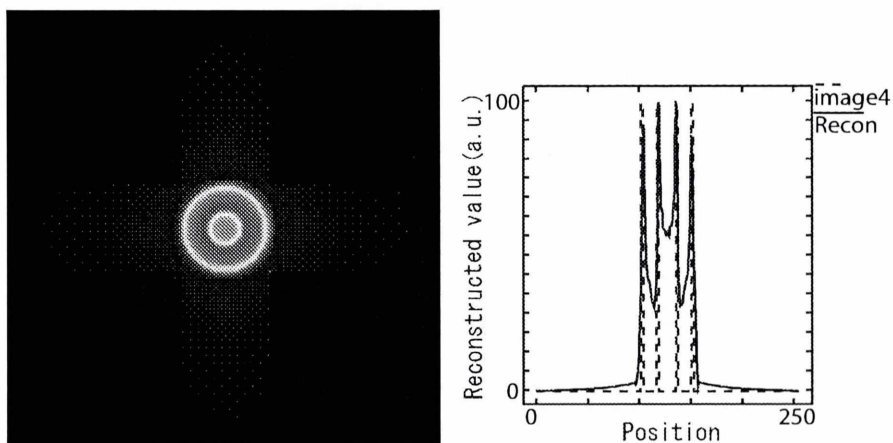


Fig. 3.45: 原画像 4 # 128 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $10 \times 10$ )

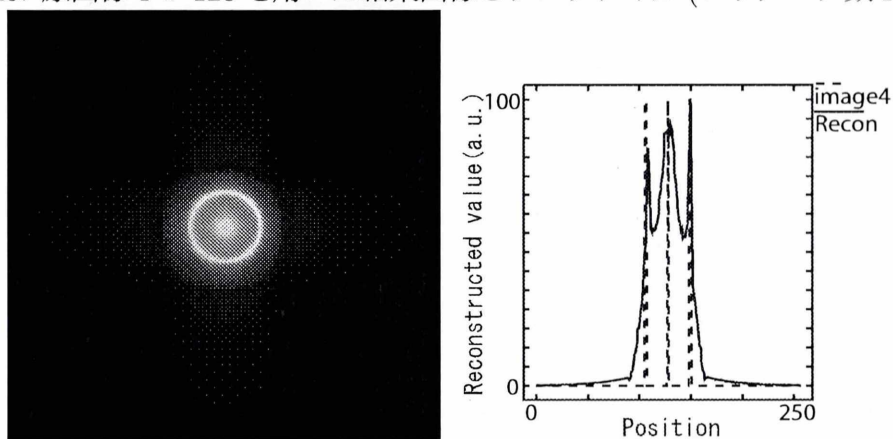


Fig. 3.46: 原画像 4 # 118 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $10 \times 10$ )

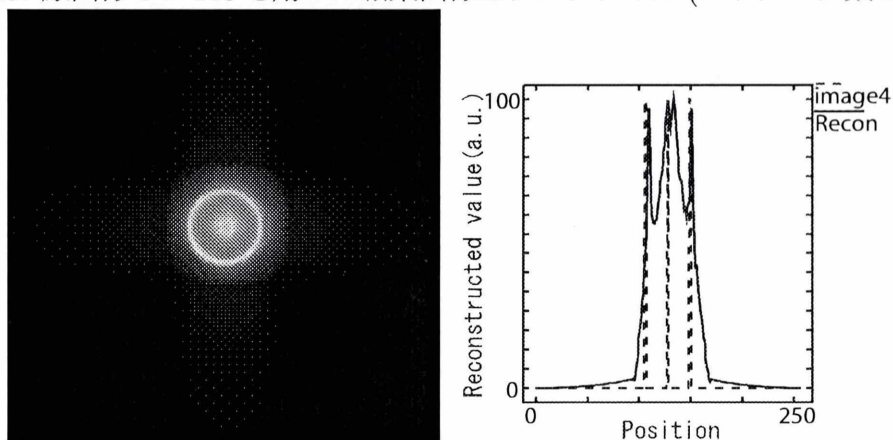


Fig. 3.47: 原画像 4 # 138 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $10 \times 10$ )

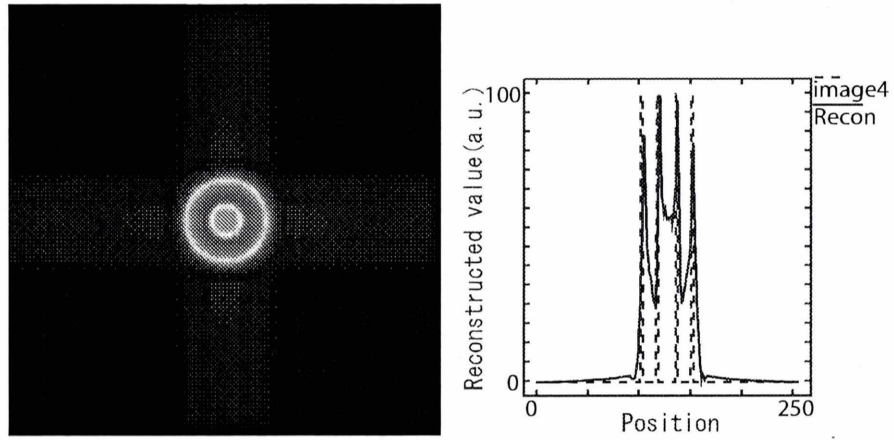


Fig. 3.48: 原画像 4 # 128 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $30 \times 30$ )

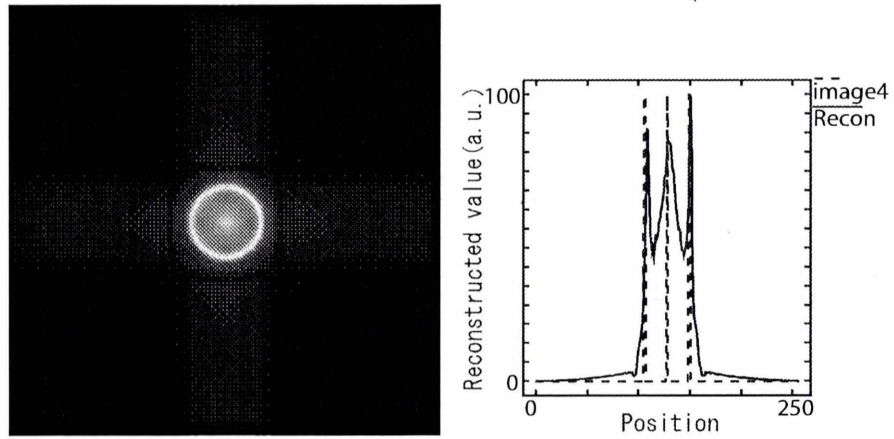


Fig. 3.49: 原画像 4 # 118 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $30 \times 30$ )

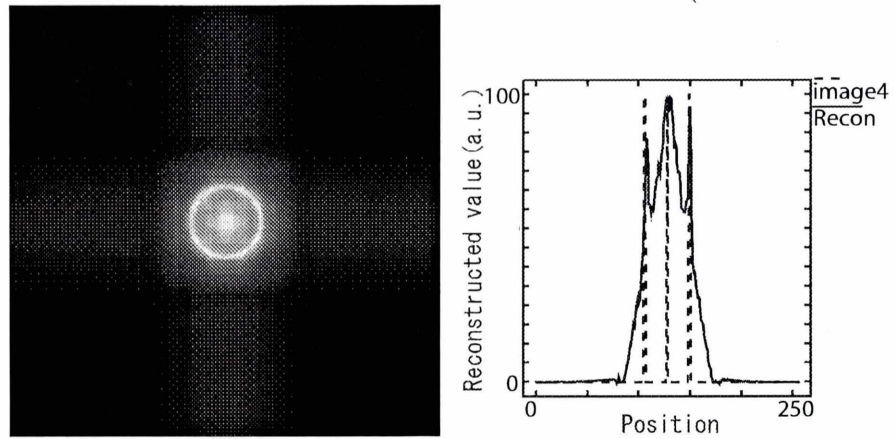


Fig. 3.50: 原画像 4 # 138 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $30 \times 30$ )



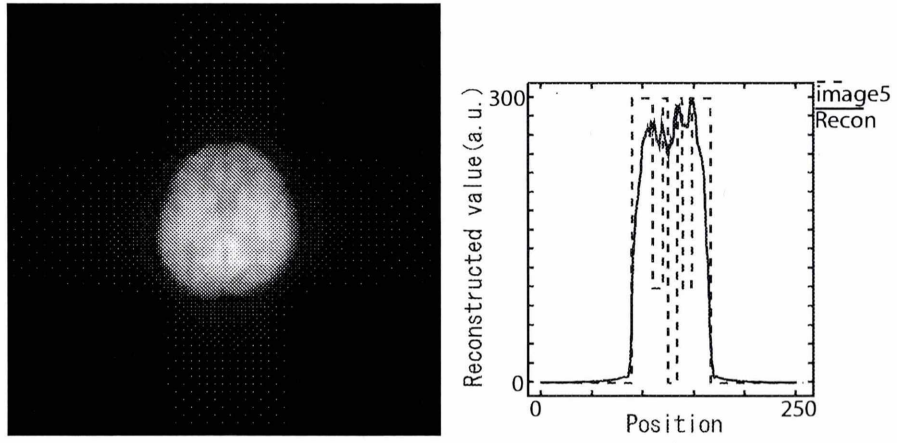


Fig. 3.51: 原画像 5 # 128 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $10 \times 10$ )

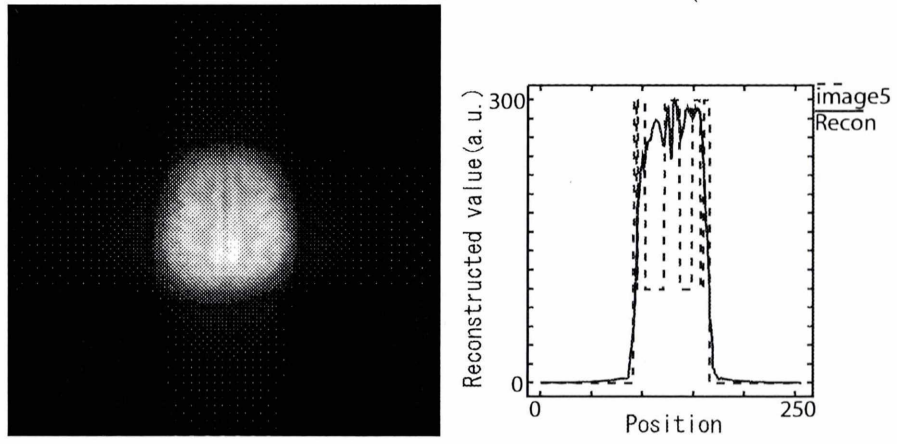


Fig. 3.52: 原画像 5 # 118 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $10 \times 10$ )

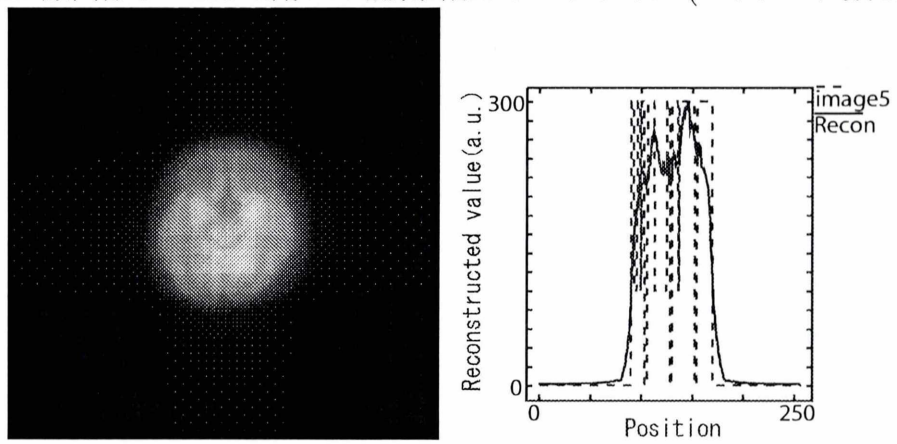


Fig. 3.53: 原画像 5 # 138 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $10 \times 10$ )

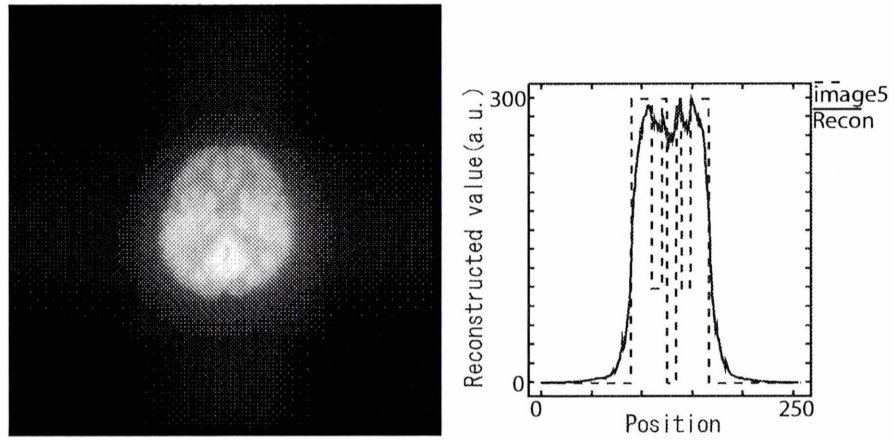


Fig. 3.54: 原画像 5 # 128 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $30 \times 30$ )

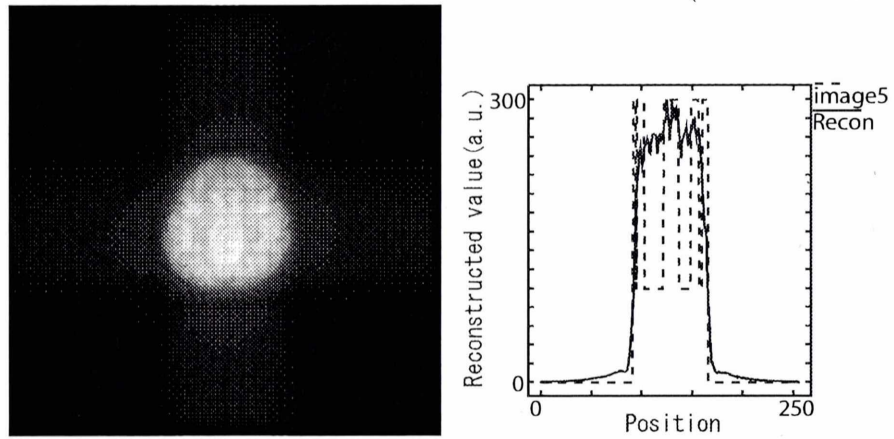


Fig. 3.55: 原画像 5 # 118 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $30 \times 30$ )

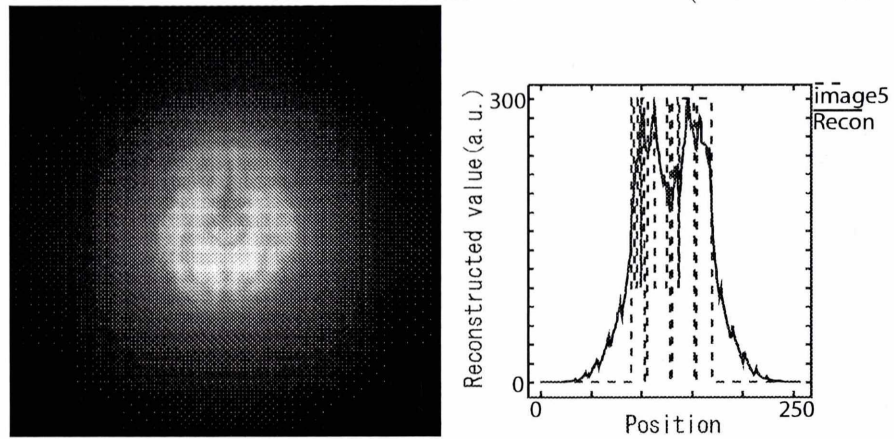


Fig. 3.56: 原画像 5 # 138 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $30 \times 30$ )

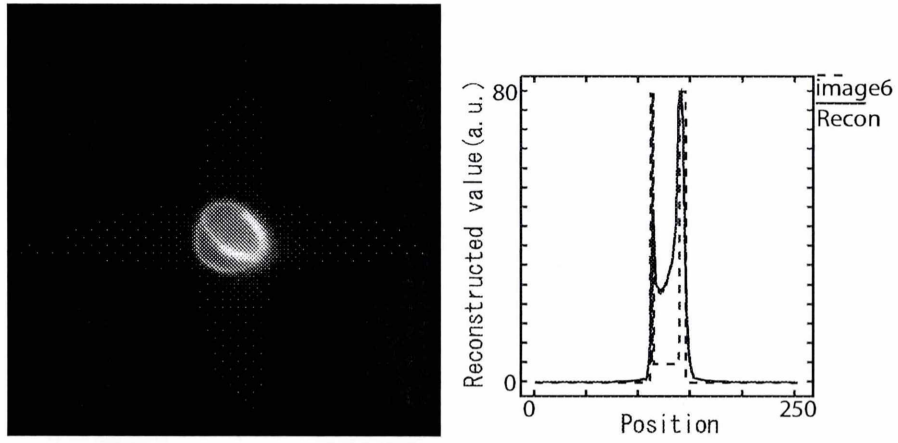


Fig. 3.57: 原画像 6 # 128 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $10 \times 10$ )

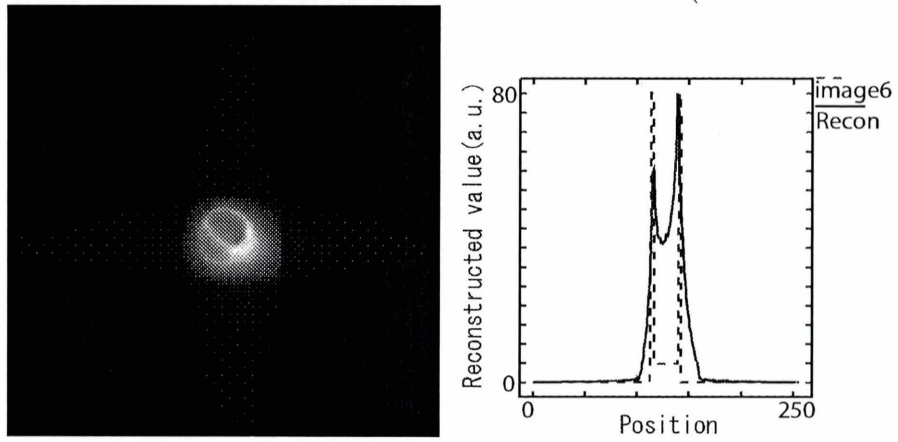


Fig. 3.58: 原画像 6 # 118 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $10 \times 10$ )

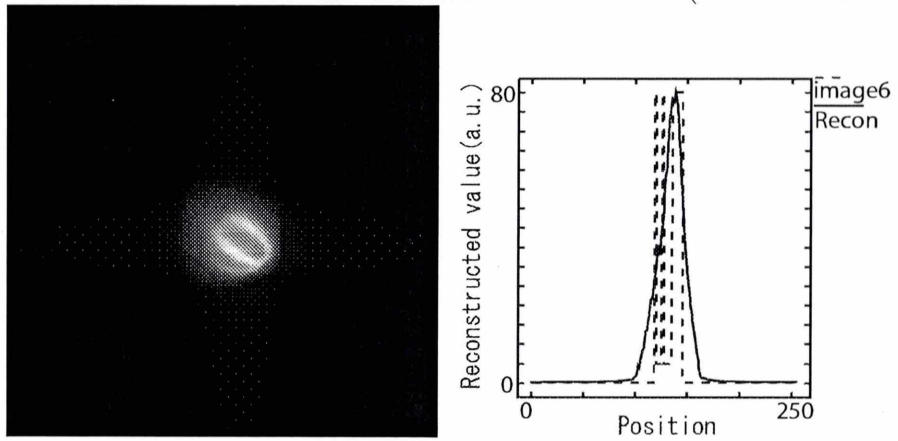


Fig. 3.59: 原画像 6 # 138 を用いた結果画像とプロフィール (コリメータ数  $10 \times 10$ )



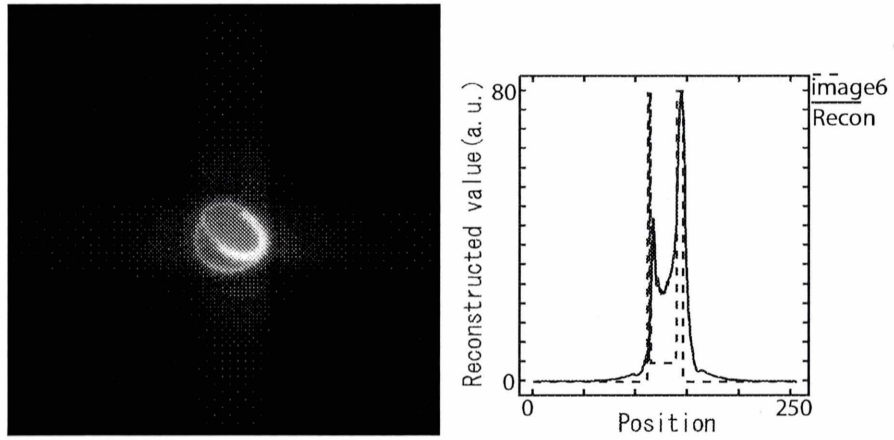


Fig. 3.60: 原画像 6 # 128 を用いた結果画像とプロファイル (コリメータ数  $30 \times 30$ )

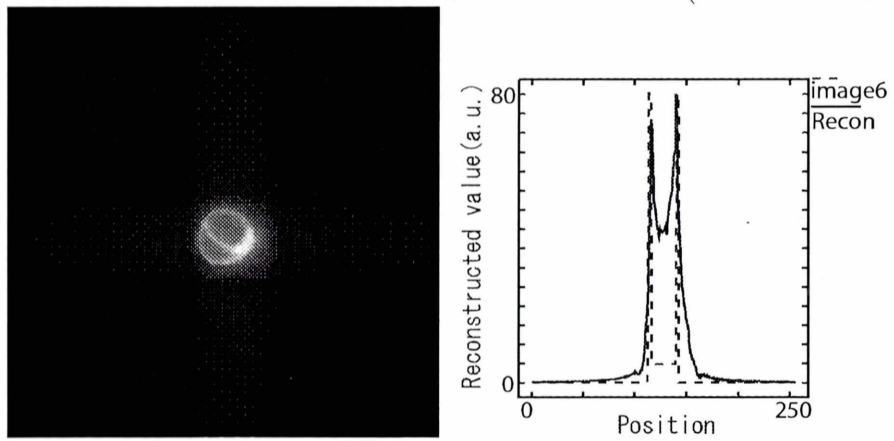


Fig. 3.61: 原画像 6 # 118 を用いた結果画像とプロファイル (コリメータ数  $30 \times 30$ )

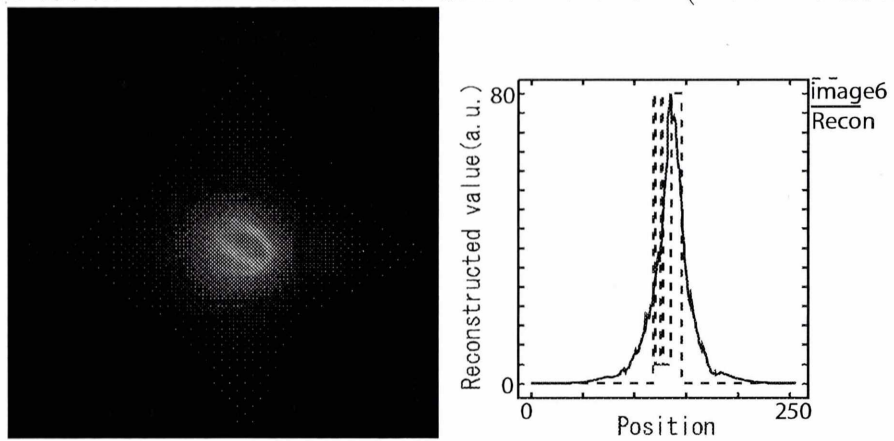


Fig. 3.62: 原画像 6 # 138 を用いた結果画像とプロファイル (コリメータ数  $30 \times 30$ )

### 3.3.3 $z_0$ の値を変化させたシミュレーション

$z_0$  の値を 3.5, 8.0 に変化させた結果を以下の Fig.3.63~80 に示す.

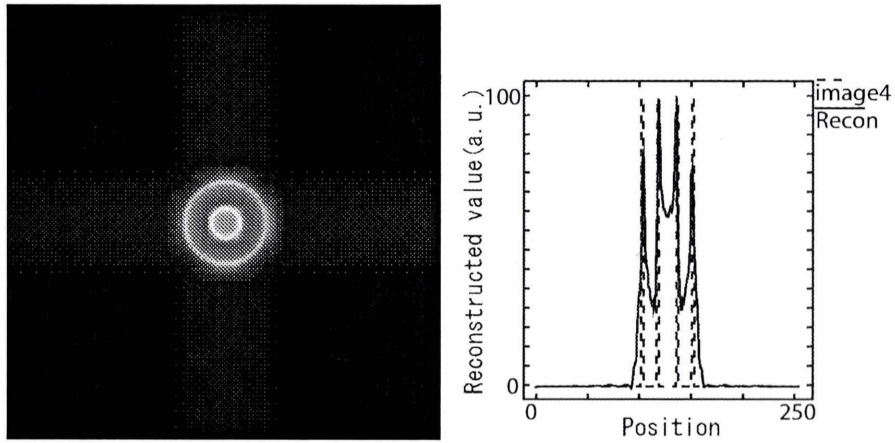


Fig. 3.63: 原画像 4 # 128 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 3.5$ )

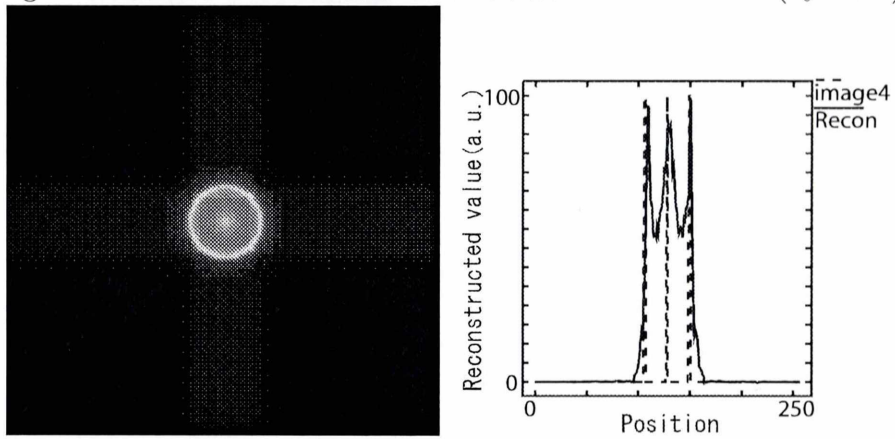


Fig. 3.64: 原画像 4 # 118 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 3.5$ )

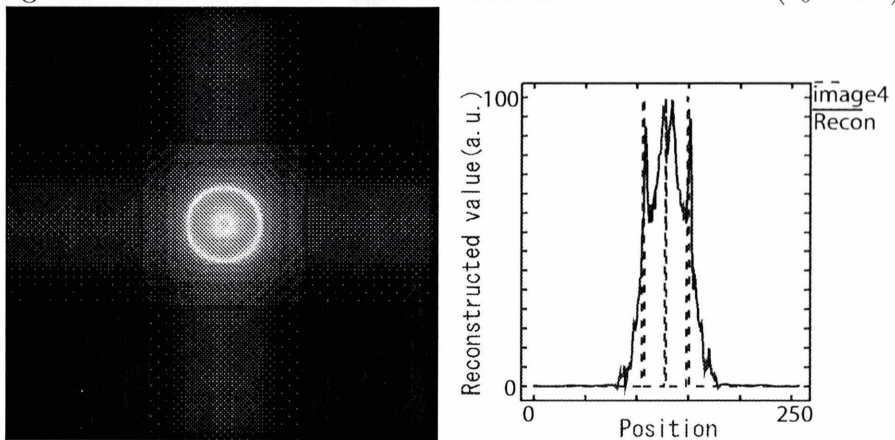


Fig. 3.65: 原画像 4 # 138 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 3.5$ )

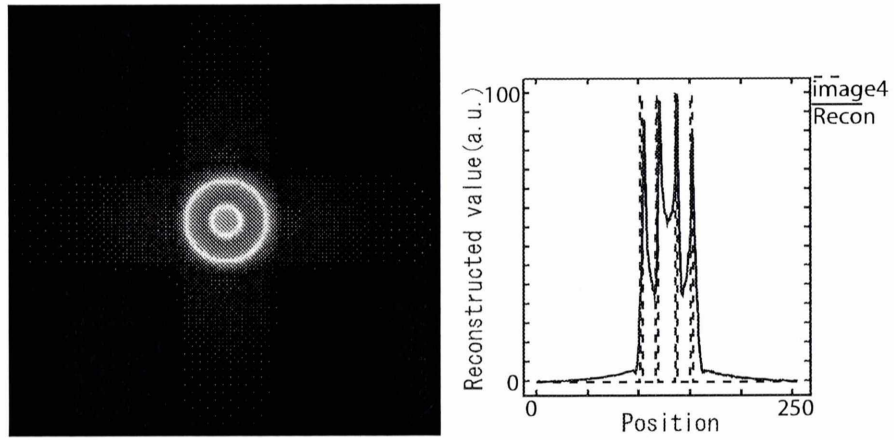


Fig. 3.66: 原画像 4 # 128 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 8.0$ )

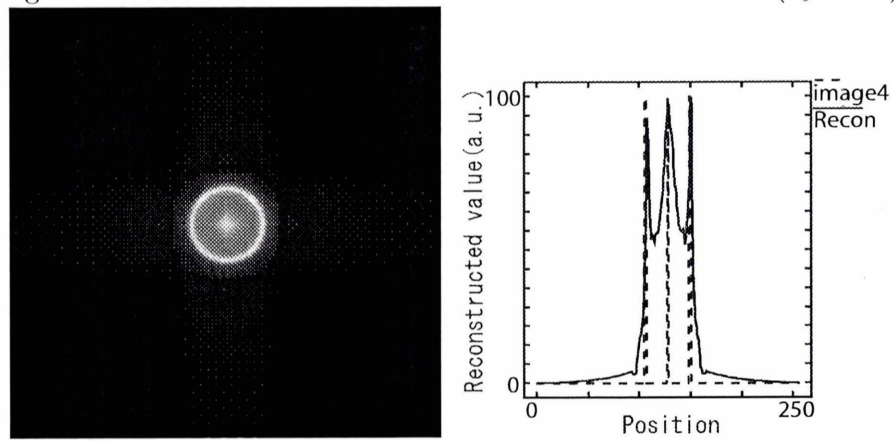


Fig. 3.67: 原画像 4 # 118 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 8.0$ )

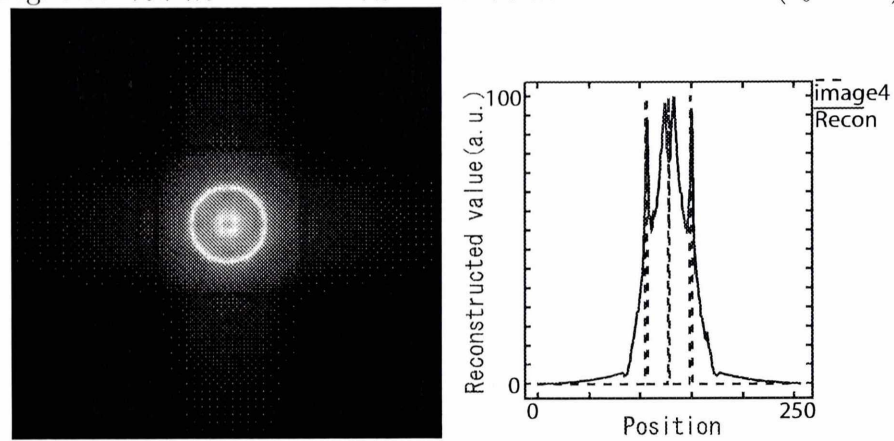


Fig. 3.68: 原画像 4 # 138 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 8.0$ )

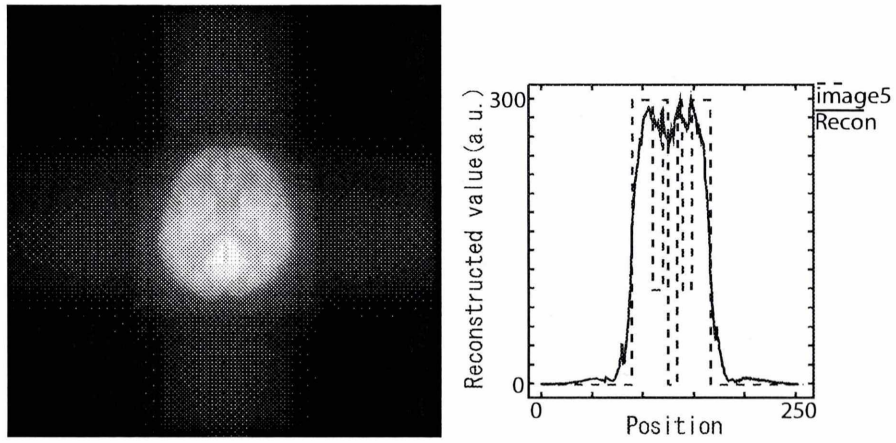


Fig. 3.69: 原画像 5 # 128 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 3.5$ )

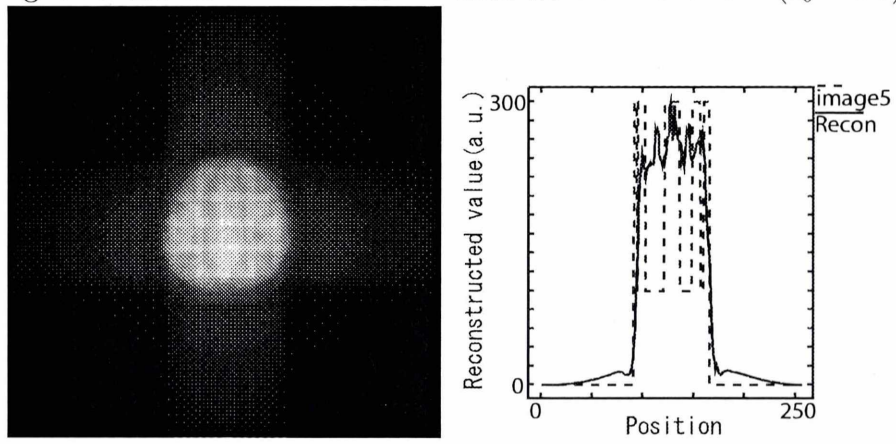


Fig. 3.70: 原画像 5 # 118 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 3.5$ )

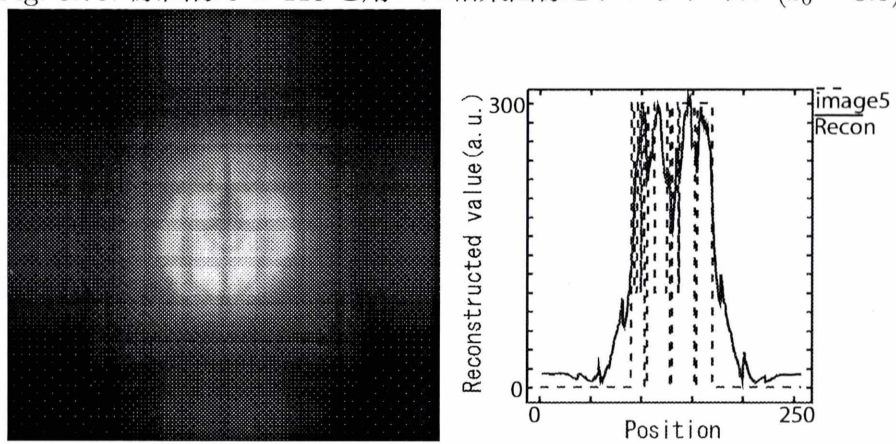


Fig. 3.71: 原画像 5 # 138 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 3.5$ )



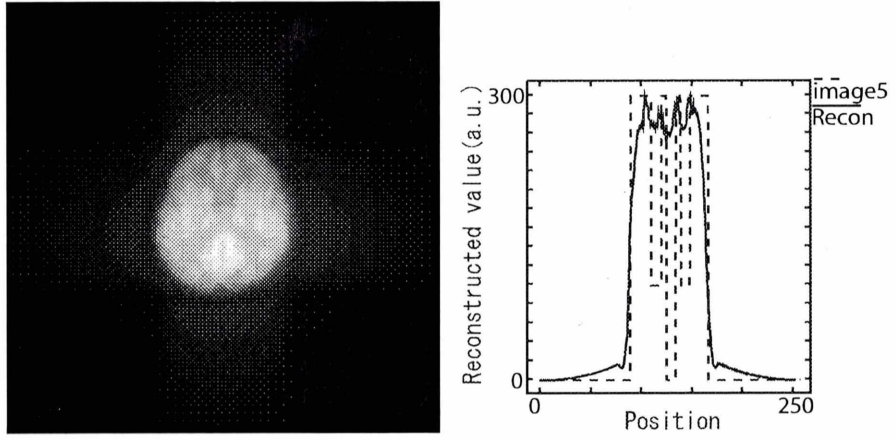


Fig. 3.72: 原画像 5 # 128 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 8.0$ )

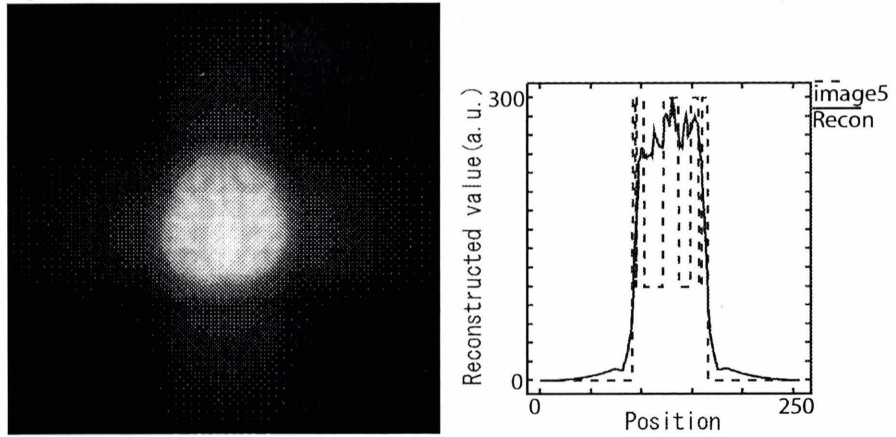


Fig. 3.73: 原画像 5 # 118 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 8.0$ )

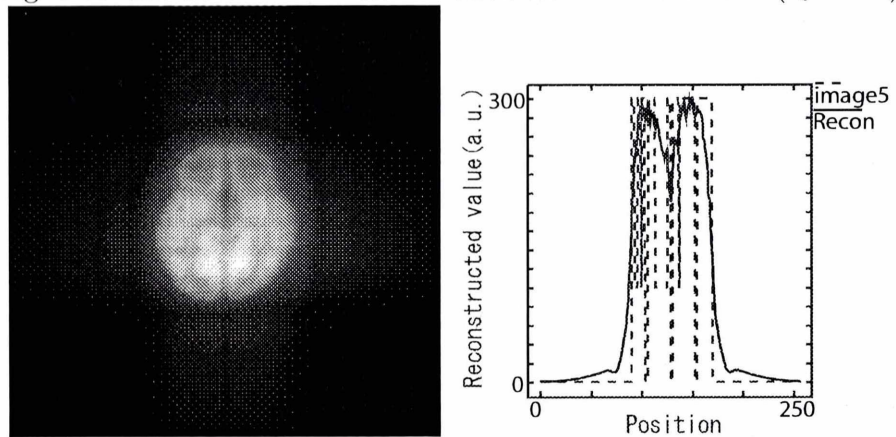


Fig. 3.74: 原画像 5 # 138 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 8.0$ )

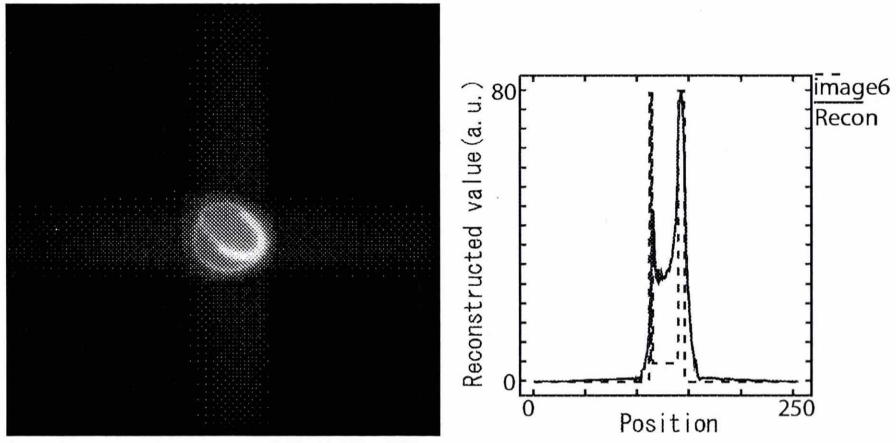


Fig. 3.75: 原画像 6 # 128 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 3.5$ )

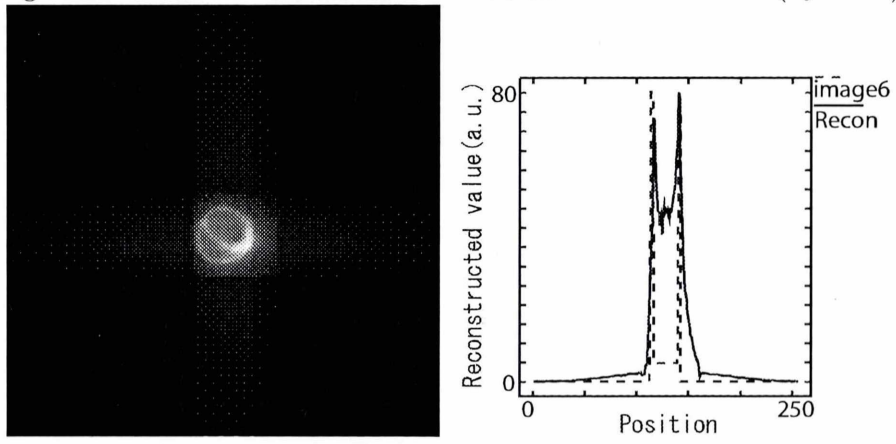


Fig. 3.76: 原画像 6 # 118 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 3.5$ )

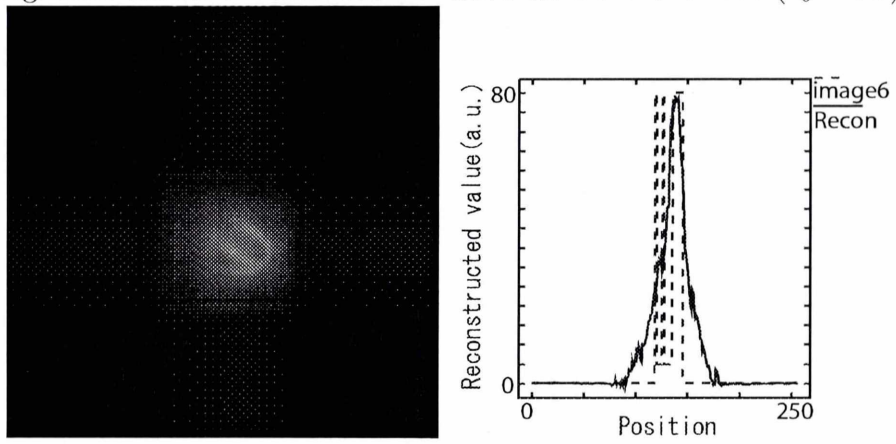


Fig. 3.77: 原画像 6 # 138 を用いた結果画像とプロフィール ( $z_0 = 3.5$ )

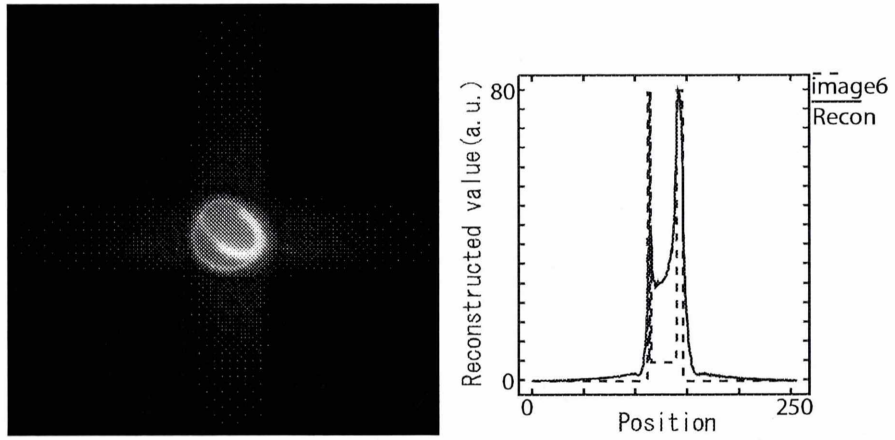


Fig. 3.78: 原画像 6 # 128 を用いた結果画像とプロファイル ( $z_0 = 8.0$ )

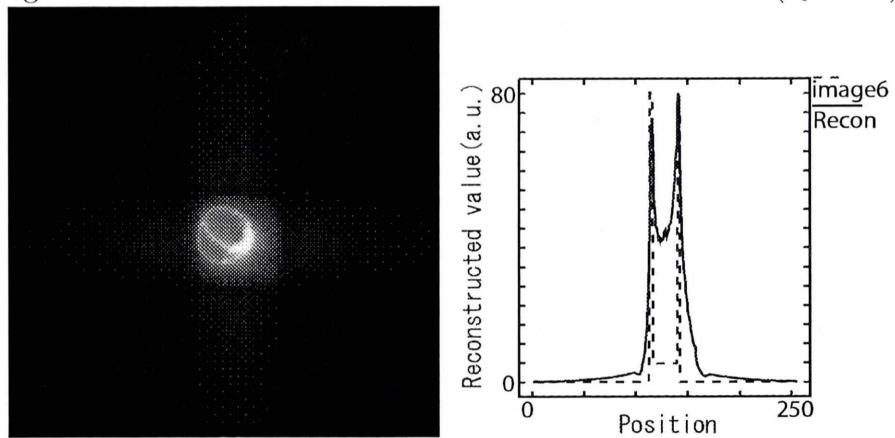


Fig. 3.79: 原画像 6 # 118 を用いた結果画像とプロファイル ( $z_0 = 8.0$ )

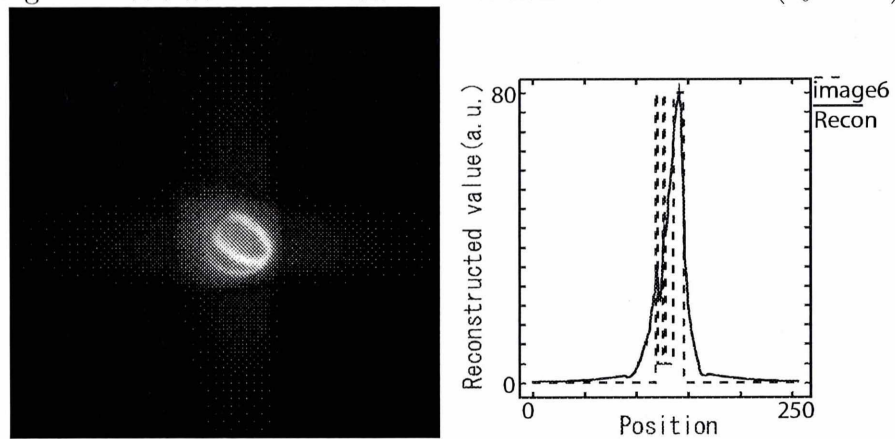


Fig. 3.80: 原画像 6 # 138 を用いた結果画像とプロファイル ( $z_0 = 8.0$ )



### 3.3.4 $z$ の値を変化させたシミュレーション

$z$  の値を 228, 242 に減少させた結果を以下の Fig.3.81~98 に示す.  $z$  の値は基準に設定したパラメータより大きくしてしまうと検出器数より大きくなってしまいうため、再構成ができない. そのため、パラメータの変化は減少のみとした.

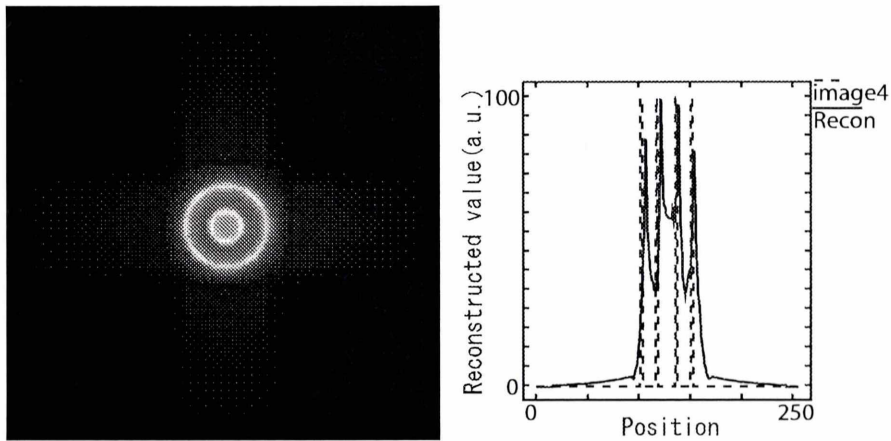


Fig. 3.81: 原画像 4 # 128 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 228$ )

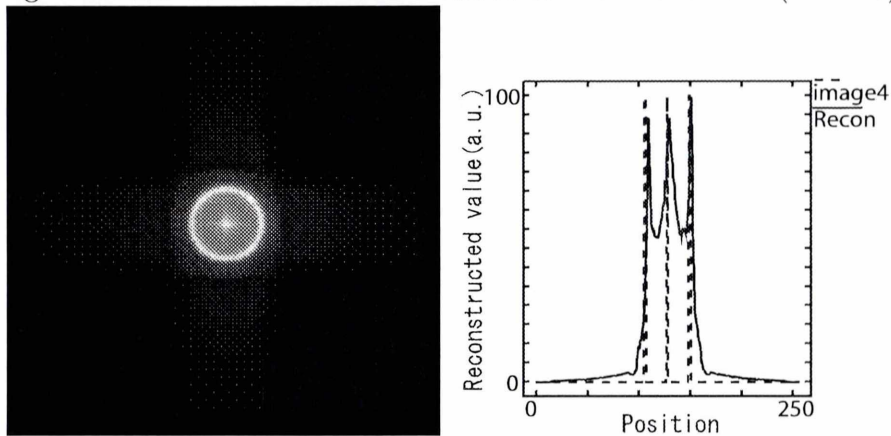


Fig. 3.82: 原画像 4 # 118 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 228$ )

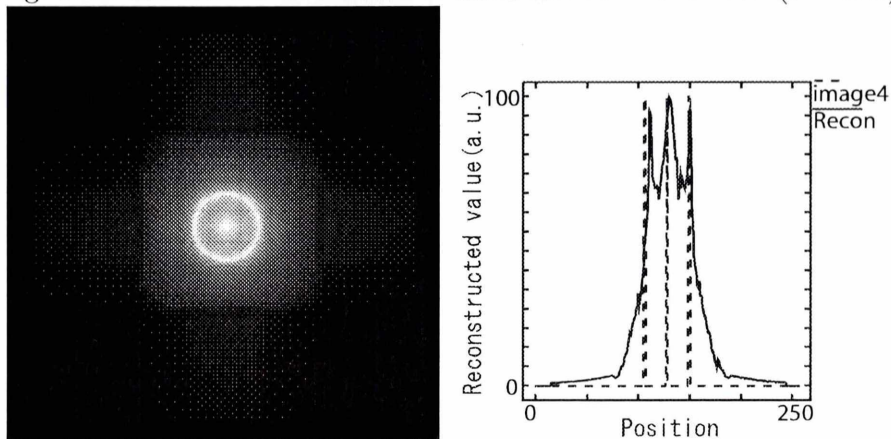


Fig. 3.83: 原画像 4 # 138 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 228$ )

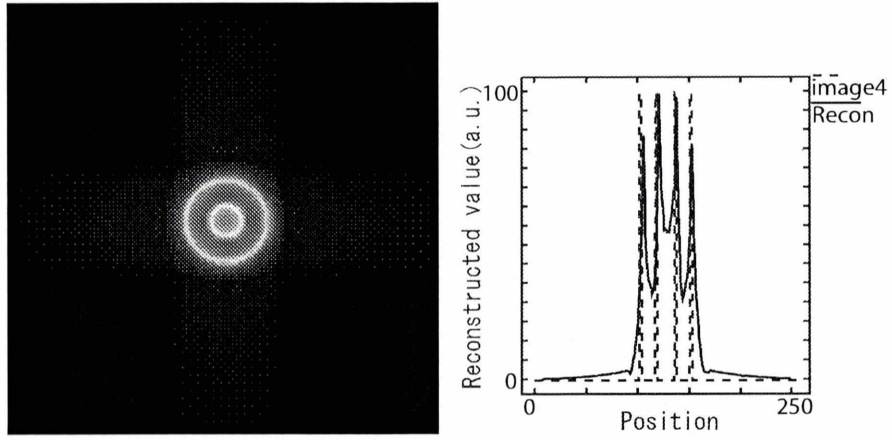


Fig. 3.84: 原画像 4 # 128 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 242$ )

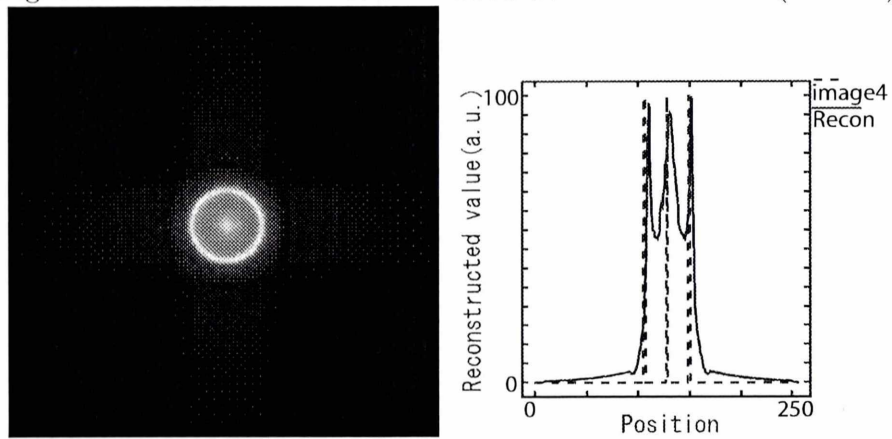


Fig. 3.85: 原画像 4 # 118 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 242$ )

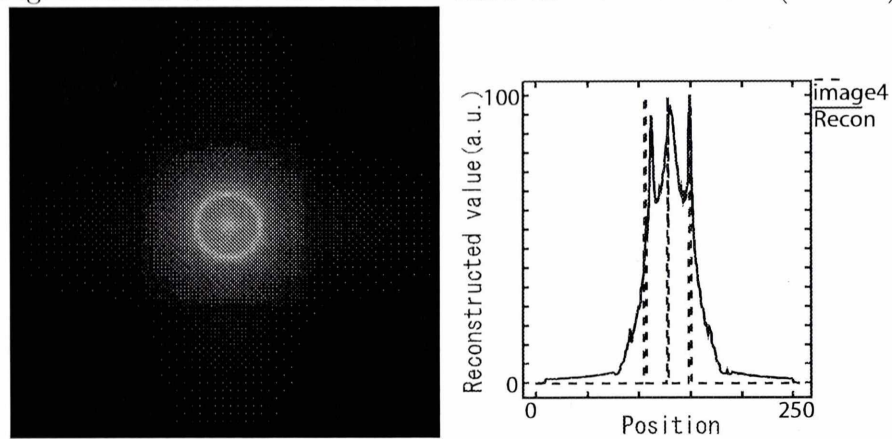


Fig. 3.86: 原画像 4 # 138 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 242$ )

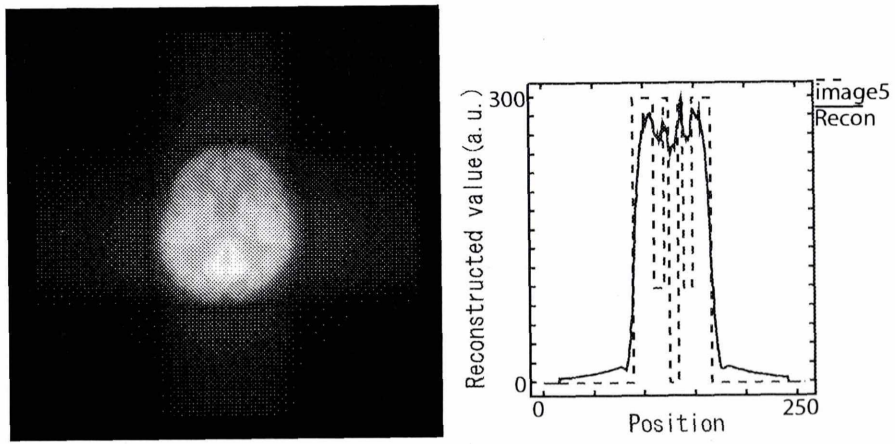


Fig. 3.87: 原画像 5 # 128 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 228$ )

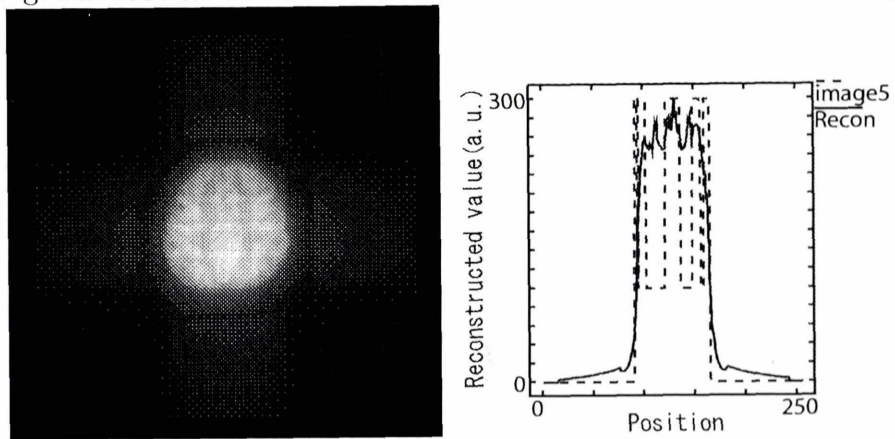


Fig. 3.88: 原画像 5 # 118 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 228$ )

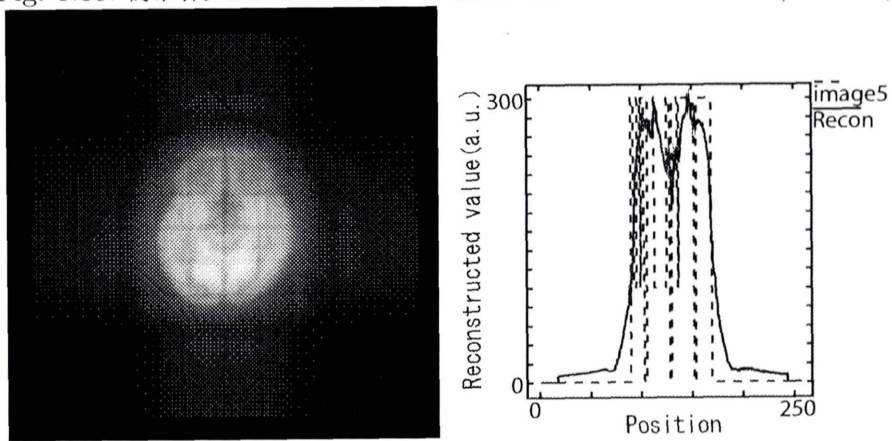


Fig. 3.89: 原画像 5 # 138 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 228$ )

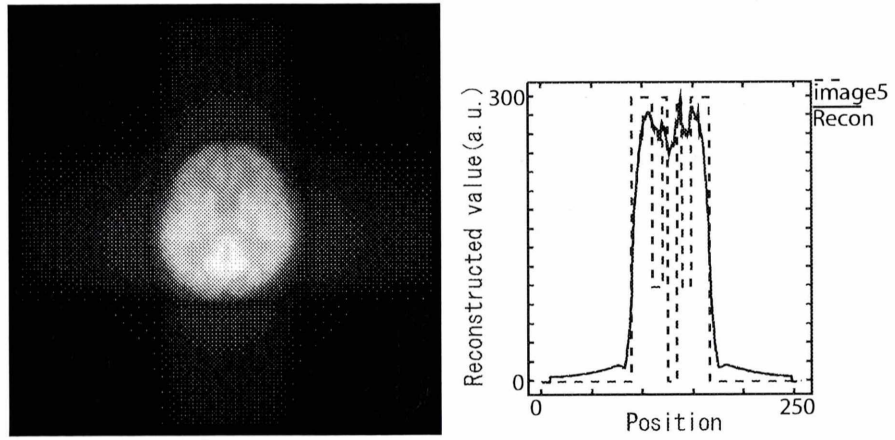


Fig. 3.90: 原画像 5 # 128 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 242$ )

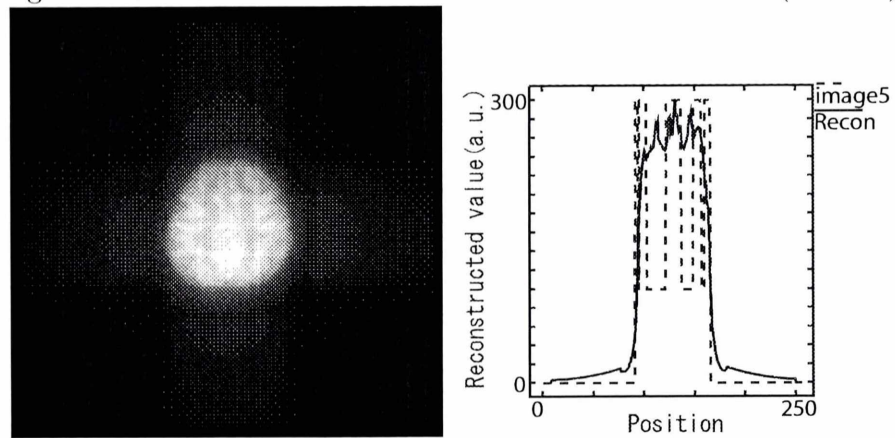


Fig. 3.91: 原画像 5 # 118 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 242$ )

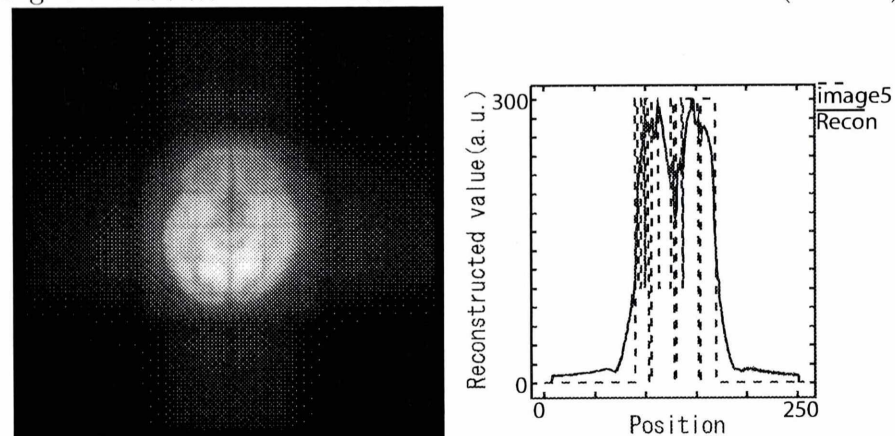


Fig. 3.92: 原画像 5 # 138 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 242$ )



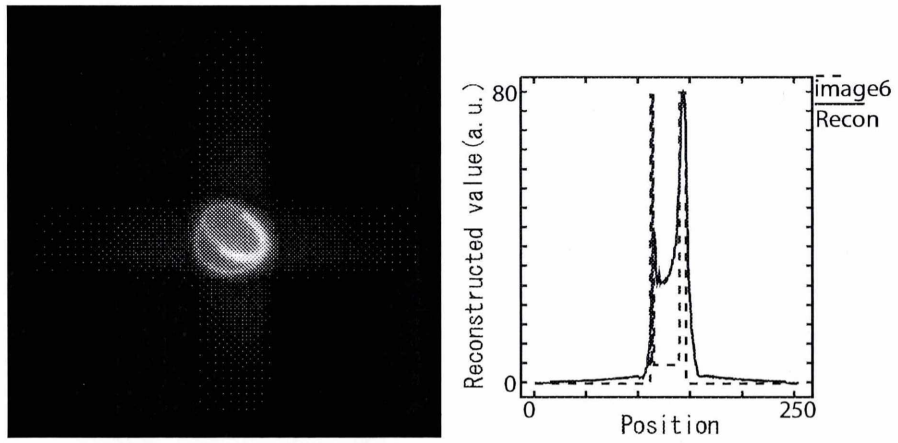


Fig. 3.93: 原画像 6 # 128 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 228$ )

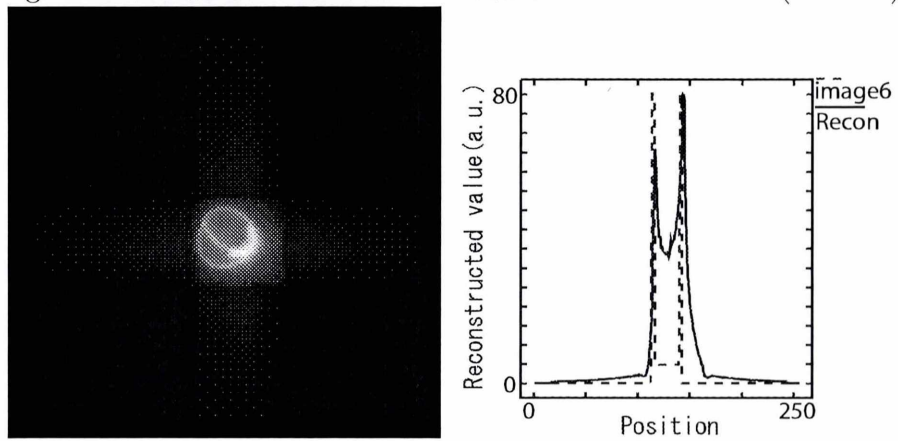


Fig. 3.94: 原画像 6 # 118 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 228$ )

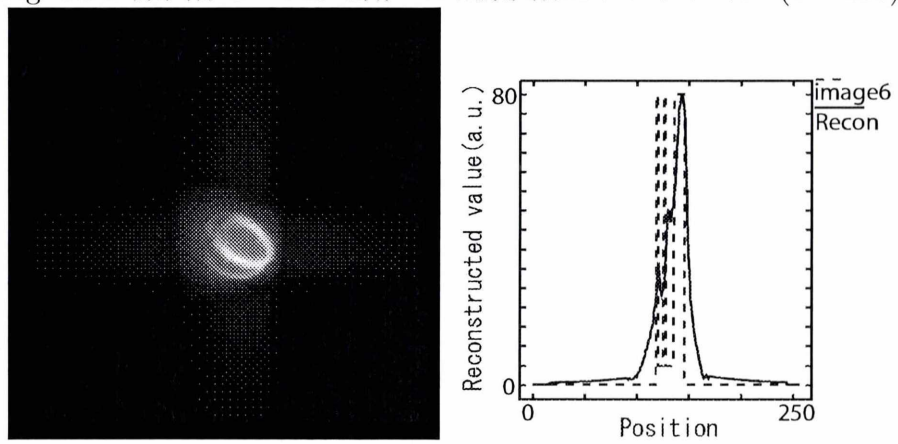


Fig. 3.95: 原画像 6 # 138 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 228$ )

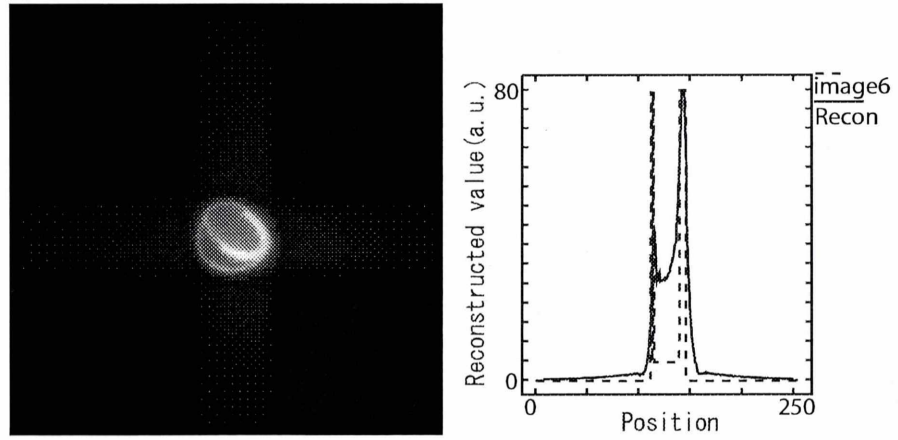


Fig. 3.96: 原画像 6 # 128 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 242$ )

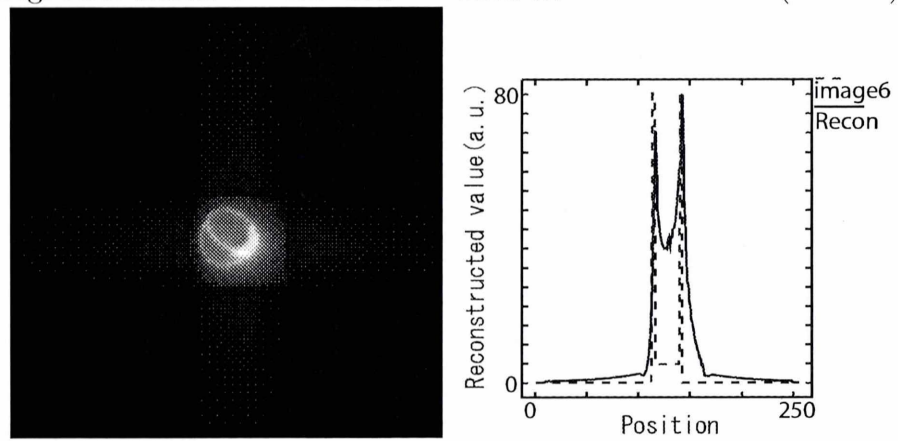


Fig. 3.97: 原画像 6 # 118 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 242$ )

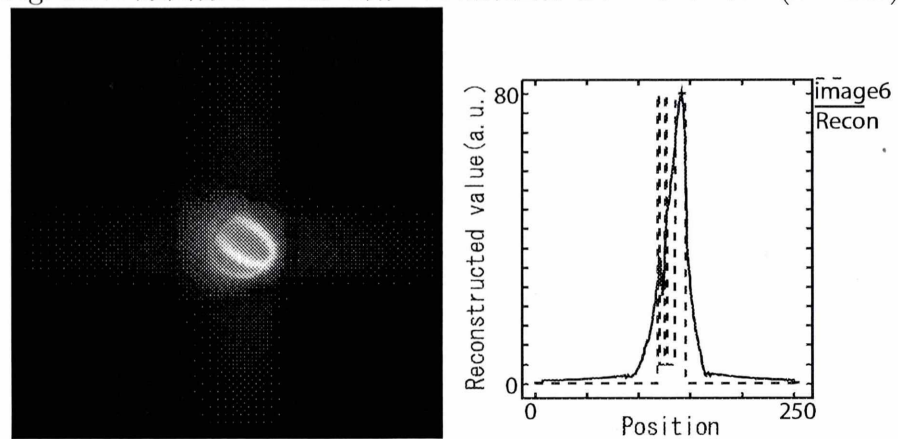


Fig. 3.98: 原画像 6 # 138 を用いた結果画像とプロフィール ( $z = 242$ )



### 3.4 点ファントムにおける FWHM の計測

以下の Fig.3.99 に示す点ファントムを用いて  $xy$  平面,  $zx$  平面それぞれの FWHM を計測した. FWHM の計測は # 64, 96, 128, 160, 192 において行った.

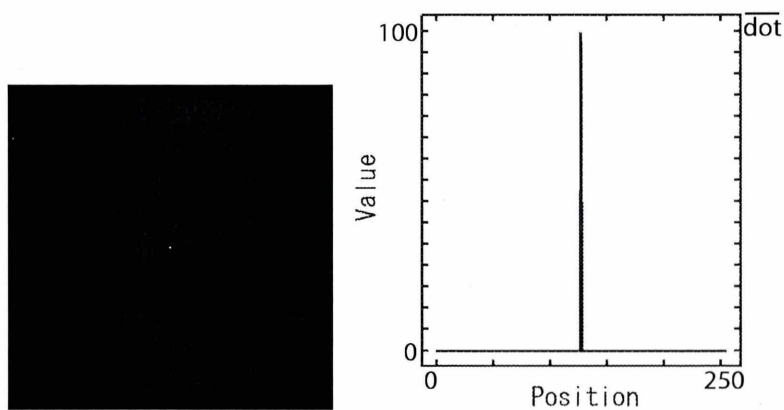


Fig. 3.99: 点ファントムとプロファイル

#### 3.4.1 $xy$ 平面における FWHM

$xy$  平面における結果を以下の Fig.3.100~104 に示す.

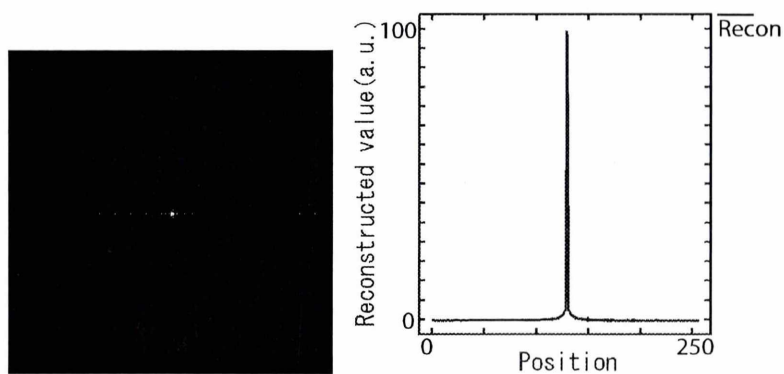


Fig. 3.100: # 64 の結果とプロファイル (FWHM=2.3pixel)

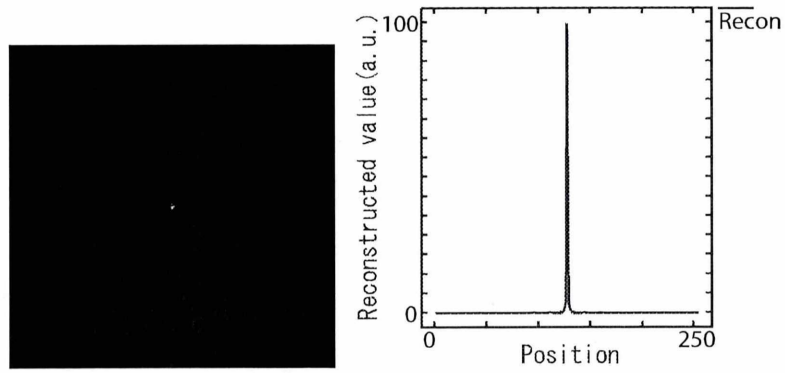


Fig. 3.101: # 96 の結果とプロファイル (FWHM=1.1pixel)

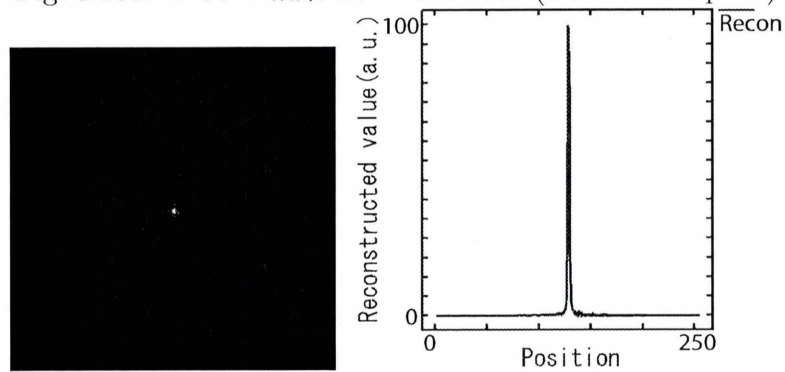


Fig. 3.102: # 128 の結果とプロファイル (FWHM=2.3pixel)

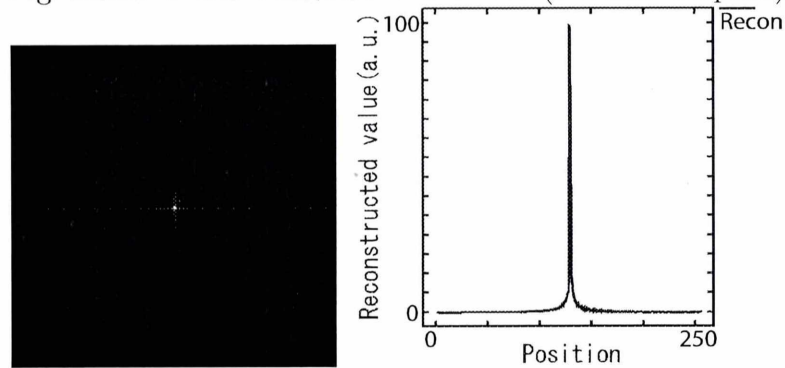


Fig. 3.103: # 160 の結果とプロファイル (FWHM=2.3pixel)

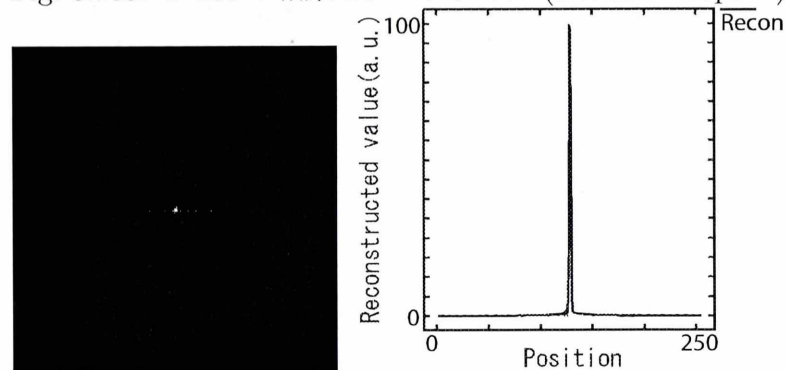


Fig. 3.104: # 192 の結果とプロファイル (FWHM=2.3pixel)

また、シミュレーション条件を変化させた際の# 64, 128, 192におけるFWHMを計測した。以下のFig.3.105~110に検出器数を $294 \times 294$ ,  $320 \times 320$ に変化させた結果を示す。

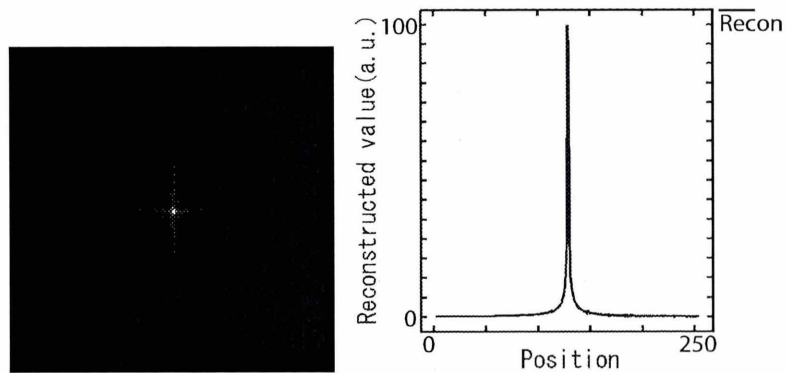


Fig. 3.105: # 64 の結果とプロファイル (検出器数  $294 \times 294$ )(FWHM=2.3pixel)

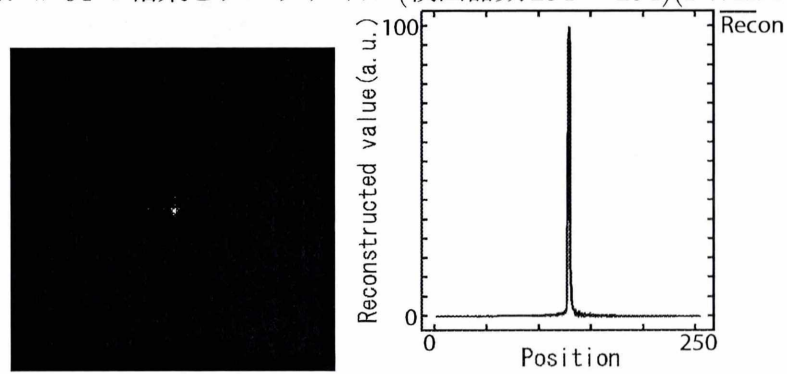


Fig. 3.106: # 128 の結果とプロファイル (検出器数  $294 \times 294$ )(FWHM=2.3pixel)

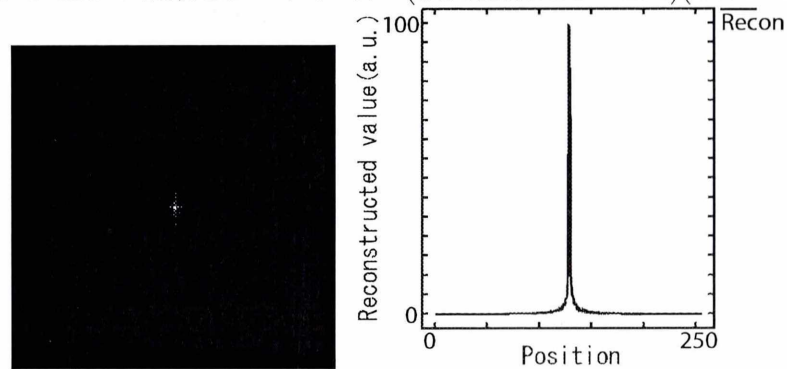


Fig. 3.107: # 192 の結果とプロファイル (検出器数  $294 \times 294$ )(FWHM=2.3pixel)

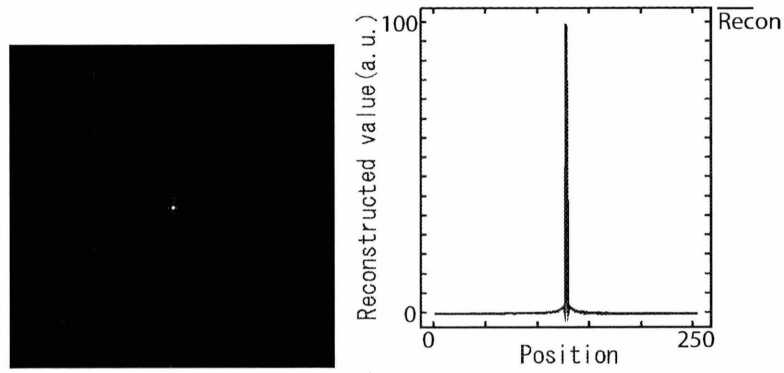


Fig. 3.108: # 64 の結果とプロファイル (検出器数  $320 \times 320$ )(FWHM=2.3pixel)

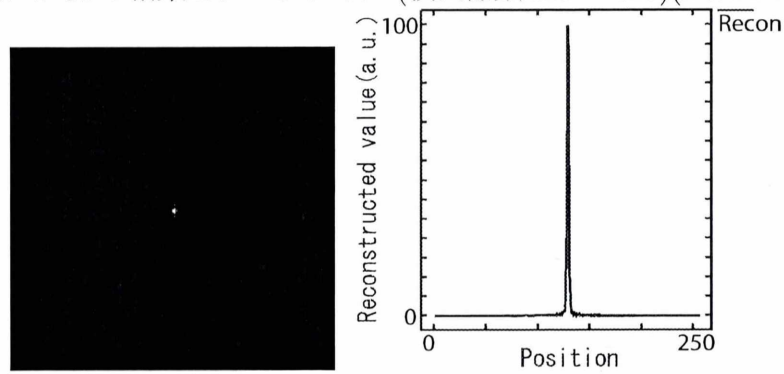


Fig. 3.109: # 128 の結果とプロファイル (検出器数  $320 \times 320$ )(FWHM=2.3pixel)

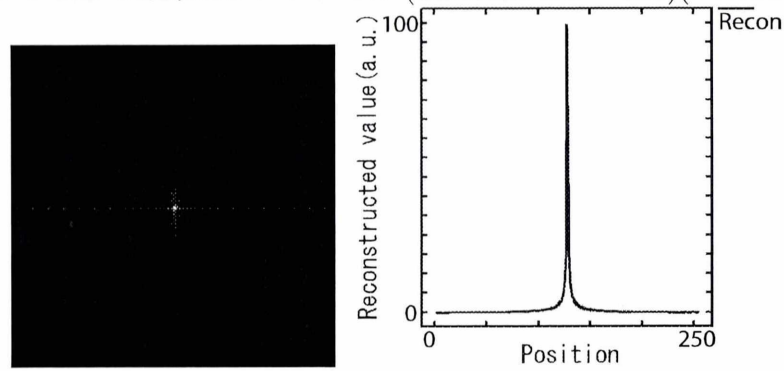


Fig. 3.110: # 192 の結果とプロファイル (検出器数  $320 \times 320$ )(FWHM=2.3pixel)

以下の Fig.3.111~116 にコリメータ数を 10, 30 に変化させた結果を示す.

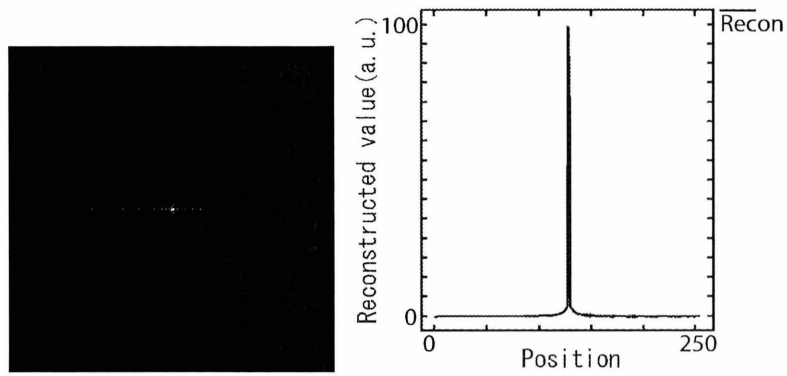


Fig. 3.111: # 64 の結果とプロファイル (コリメータ数  $10 \times 10$ )(FWHM=2.3pixel)

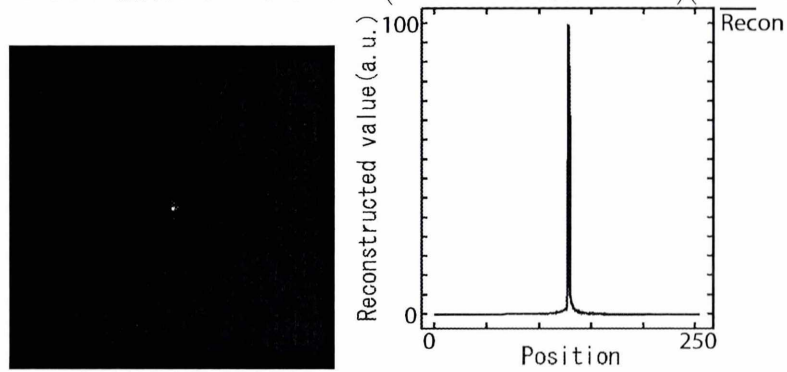


Fig. 3.112: # 128 の結果とプロファイル (コリメータ数  $10 \times 10$ )(FWHM=2.3pixel)

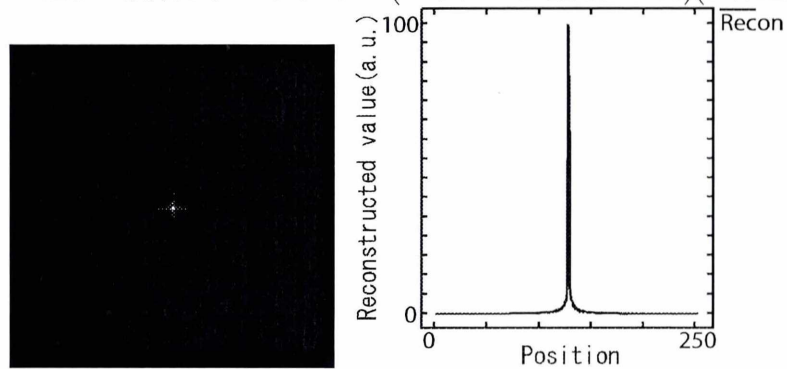


Fig. 3.113: # 192 の結果とプロファイル (コリメータ数  $10 \times 10$ )(FWHM=2.3pixel)



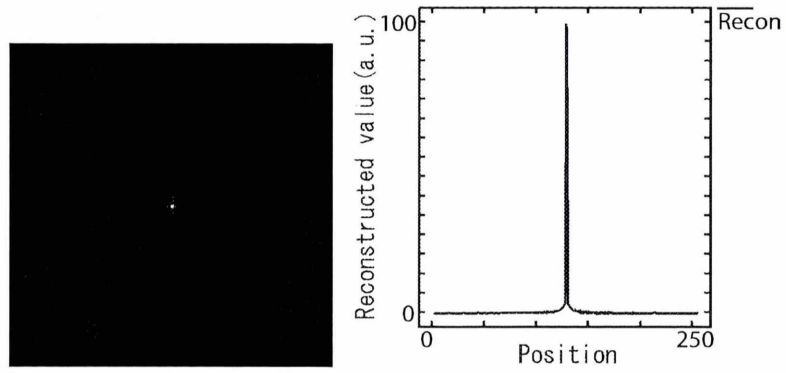


Fig. 3.114: # 64 の結果とプロファイル (コリメータ数  $30 \times 30$ )(FWHM=2.3pixel)

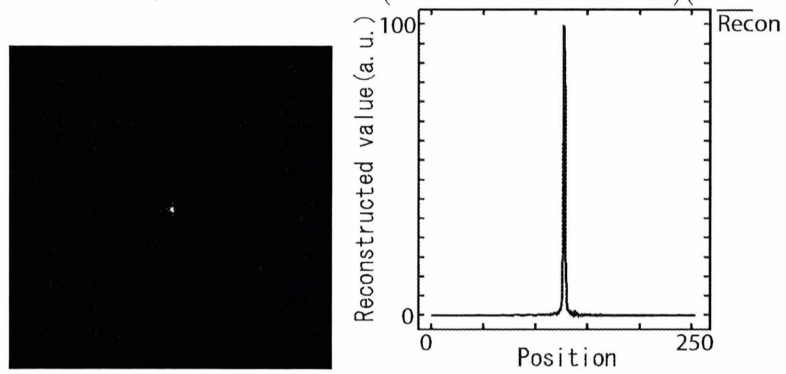


Fig. 3.115: # 128 の結果とプロファイル (コリメータ数  $30 \times 30$ )(FWHM=2.3pixel)

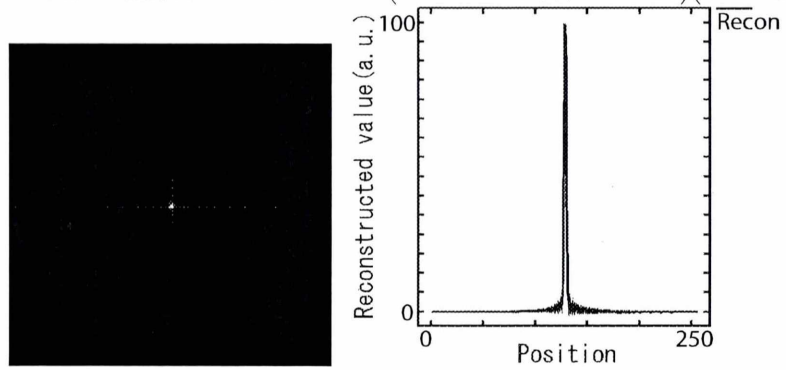


Fig. 3.116: # 192 の結果とプロファイル (コリメータ数  $30 \times 30$ )(FWHM=2.8pixel)

以下の Fig.3.117~122 に  $z_0$  を 3.5, 8.0 に変化させた結果を示す.

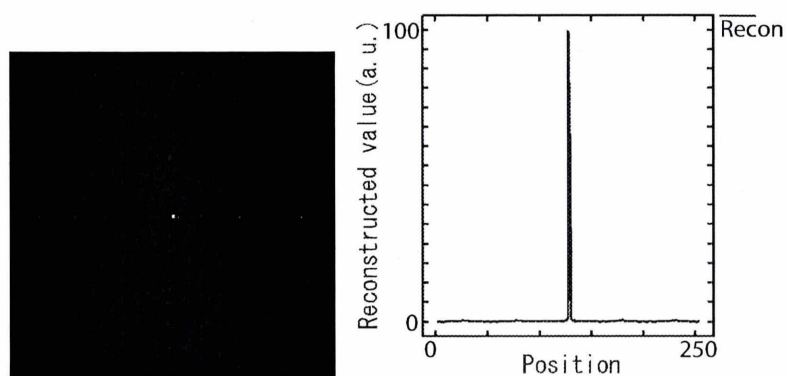


Fig. 3.117: # 64 の結果とプロファイル ( $z_0 = 3.5$ )(FWHM=2.3pixel)

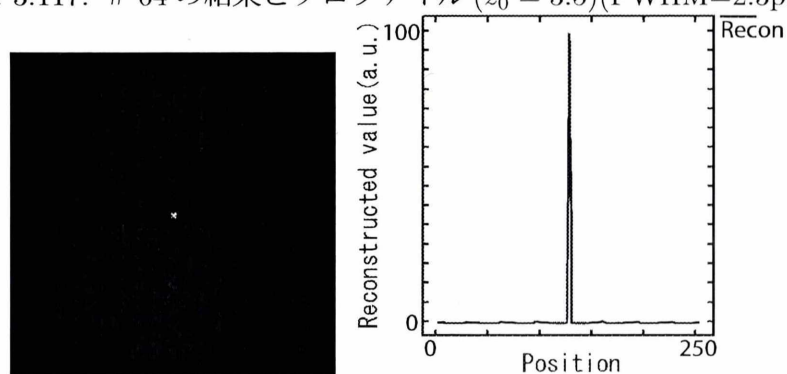


Fig. 3.118: # 128 の結果とプロファイル ( $z_0 = 3.5$ )(FWHM=2.3pixel)

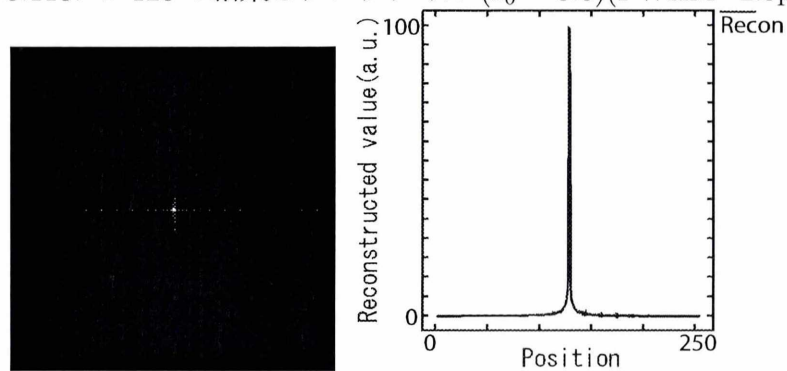


Fig. 3.119: # 192 の結果とプロファイル ( $z_0 = 3.5$ )(FWHM=2.3pixel)

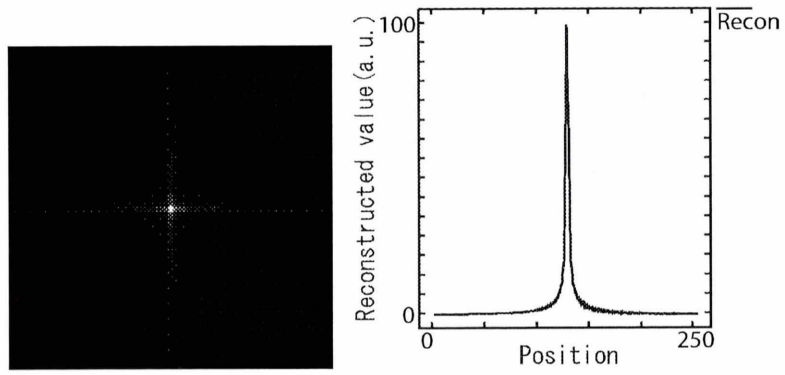


Fig. 3.120: # 64 の結果とプロファイル ( $z_0 = 8.0$ )(FWHM=2.3pixel)

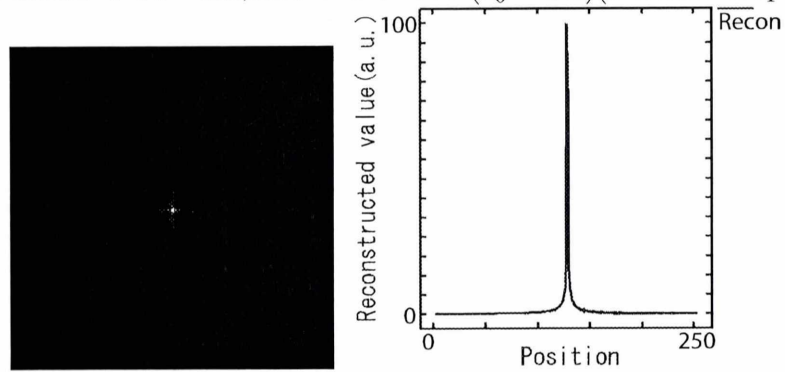


Fig. 3.121: # 128 の結果とプロファイル ( $z_0 = 8.0$ )(FWHM=4.0pixel)

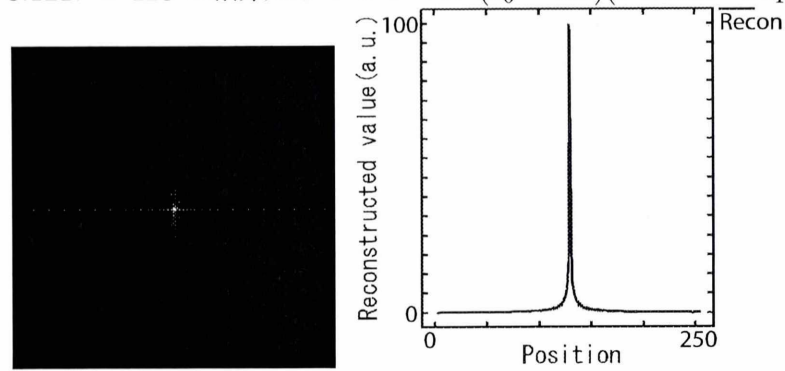


Fig. 3.122: # 192 の結果とプロファイル ( $z_0 = 8.0$ )(FWHM=2.3pixel)

以下の Fig.3.123~128 に  $z$  を 228, 242 に変化させた結果を示す.

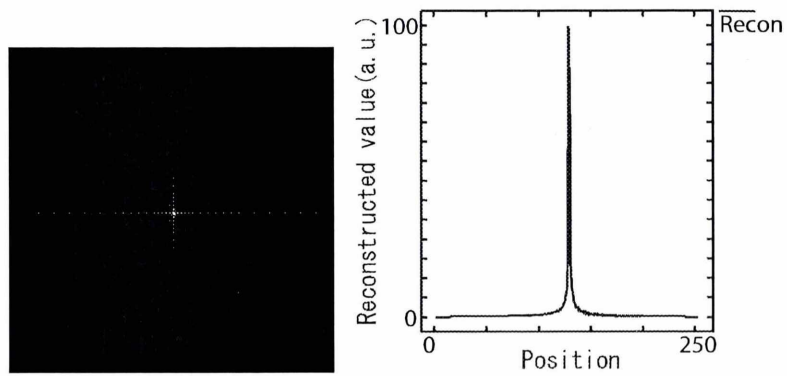


Fig. 3.123: # 64 の結果とプロファイル ( $z = 228$ )(FWHM=2.3pixel)

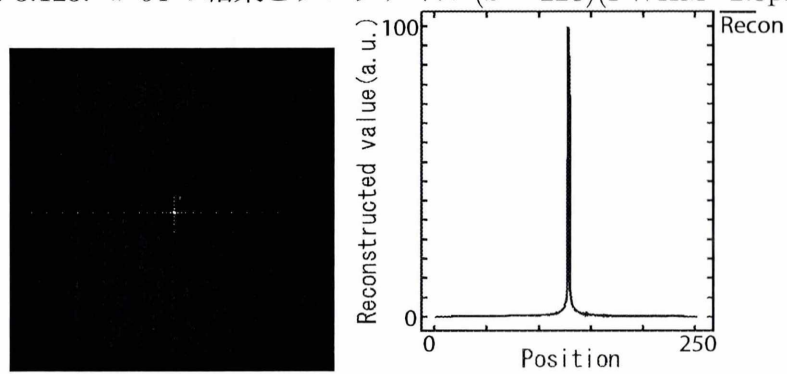


Fig. 3.124: # 128 の結果とプロファイル ( $z = 228$ )(FWHM=2.3pixel)

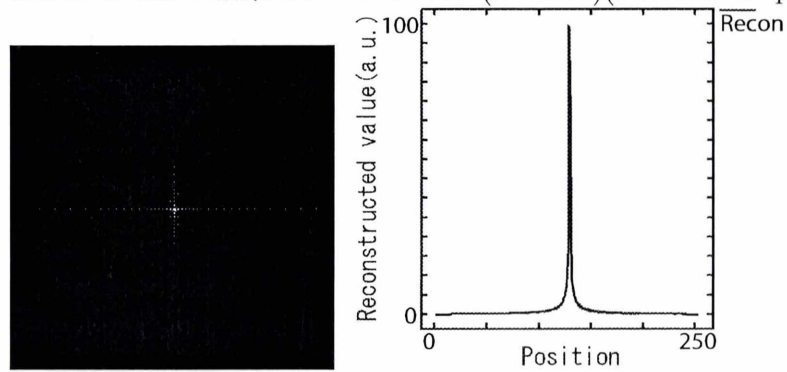


Fig. 3.125: # 192 の結果とプロファイル ( $z = 228$ )(FWHM=2.3pixel)

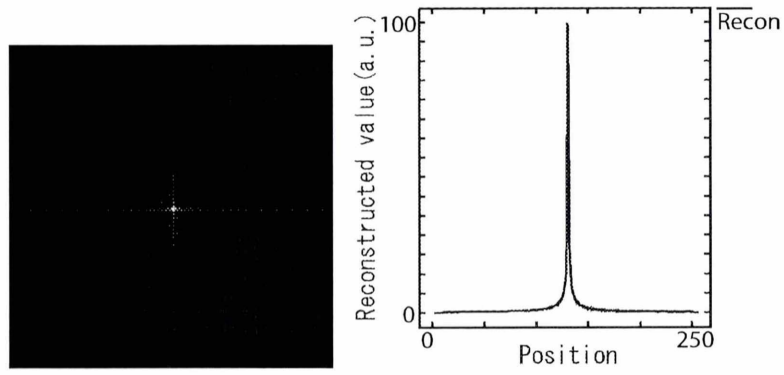


Fig. 3.126: # 64 の結果とプロファイル ( $z = 242$ )(FWHM=2.3pixel)

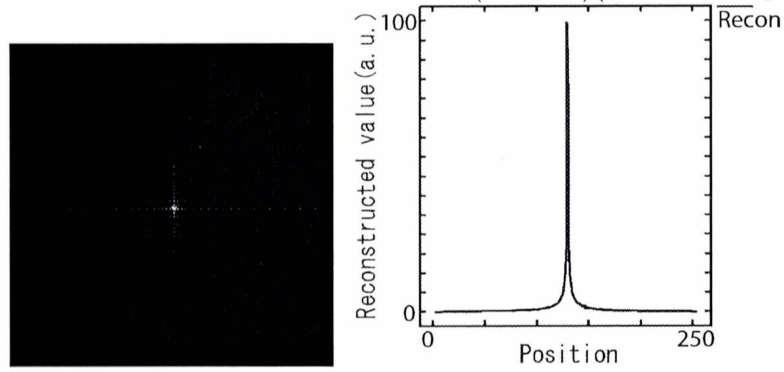


Fig. 3.127: # 128 の結果とプロファイル ( $z = 242$ )(FWHM=2.3pixel)

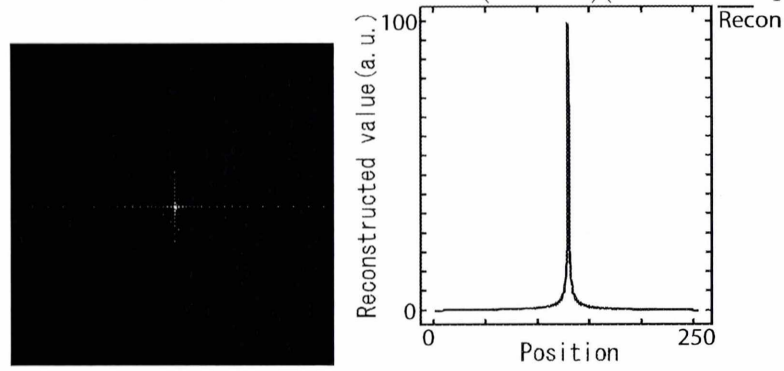


Fig. 3.128: # 192 の結果とプロファイル ( $z = 242$ )(FWHM=2.3pixel)



### 3.4.2 $zx$ 平面における FWHM

$zx$  平面における結果を以下の Fig.3.129~133 に示す.

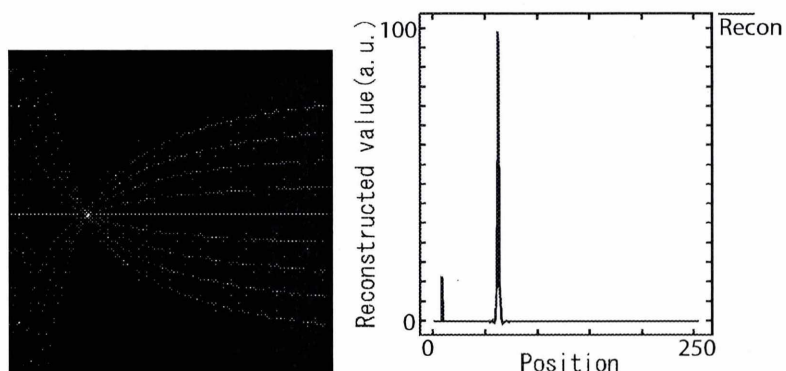


Fig. 3.129: # 64 の結果とプロフィール (FWHM=1.1pixel)

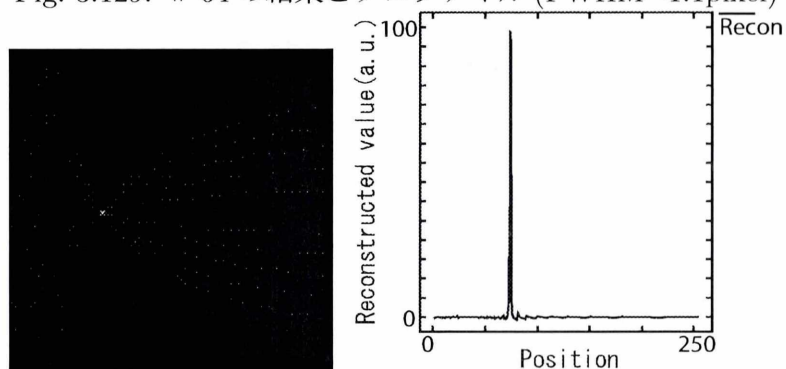


Fig. 3.130: # 96 の結果とプロフィール (FWHM=1.7pixel)

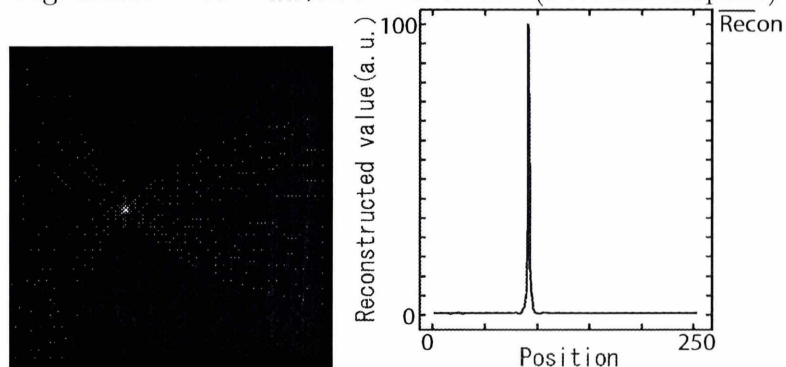


Fig. 3.131: # 128 の結果とプロフィール (FWHM=1.7pixel)

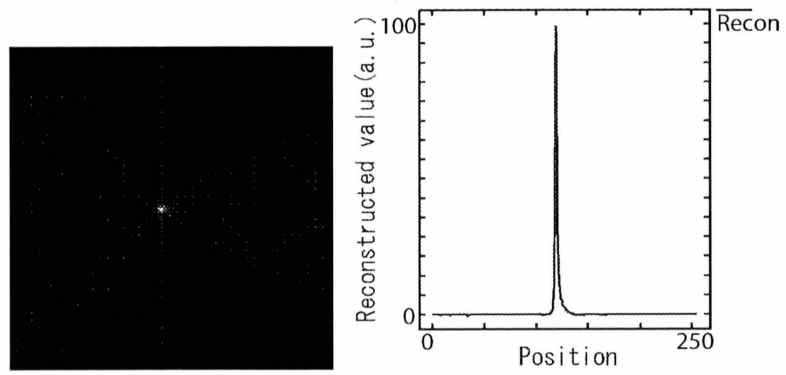


Fig. 3.132: # 160 の結果とプロフィール (FWHM=1.7pixel)

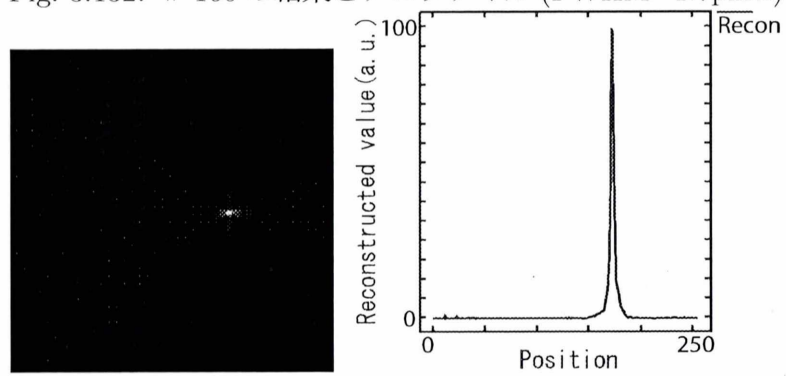


Fig. 3.133: # 192 の結果とプロフィール (FWHM=4.0pixel)

また、シミュレーション条件を変化させた際の # 64, 128, 192 における FWHM を計測した。以下の Fig.3.134~139 に検出器数を  $294 \times 294$ ,  $320 \times 320$  に変化させた結果を示す。

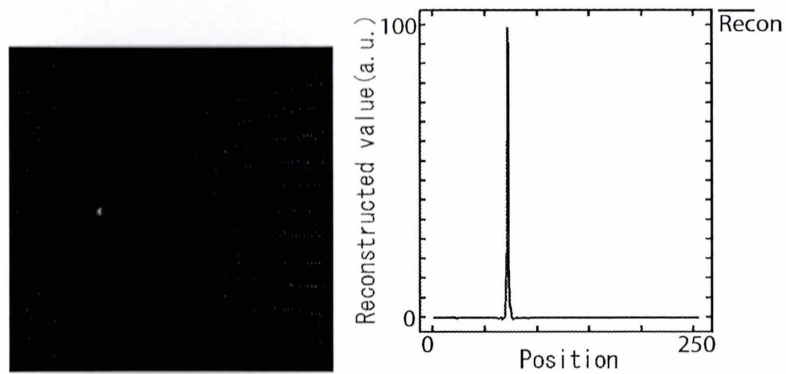


Fig. 3.134: # 64 の結果とプロファイル (検出器数  $294 \times 294$ )(FWHM=1.1pixel)

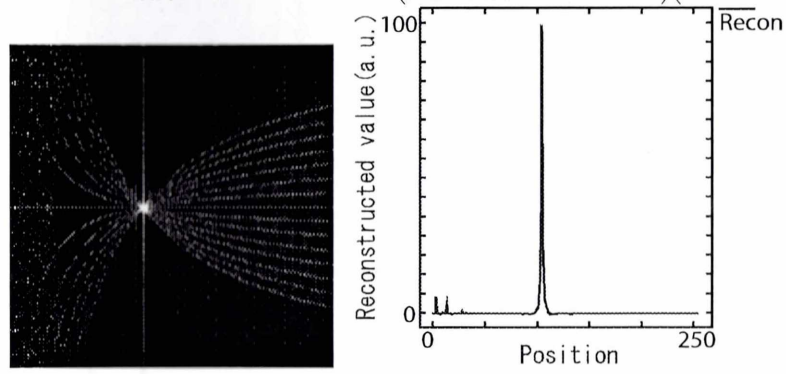


Fig. 3.135: # 128 の結果とプロファイル (検出器数  $294 \times 294$ )(FWHM=1.7pixel)

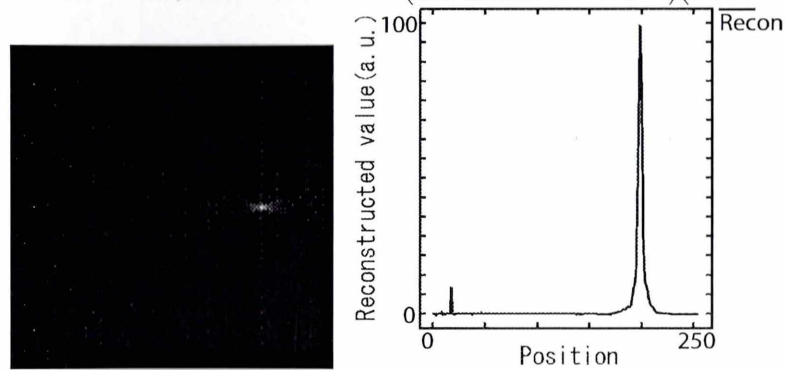


Fig. 3.136: # 192 の結果とプロファイル (検出器数  $294 \times 294$ )(FWHM=4.5pixel)

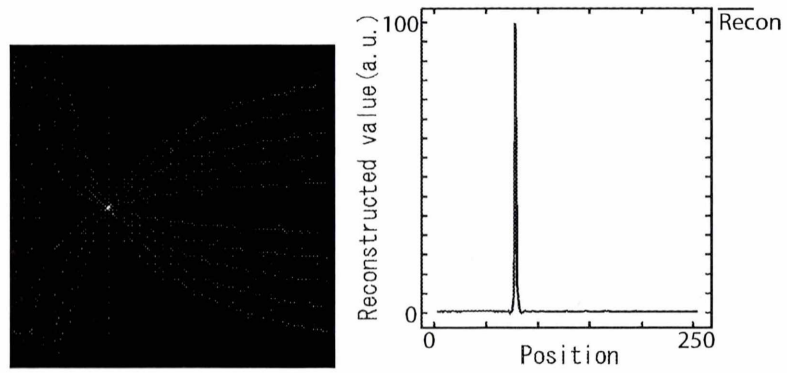


Fig. 3.137: # 64 の結果とプロファイル (検出器数  $320 \times 320$ )(FWHM=2.3pixel)

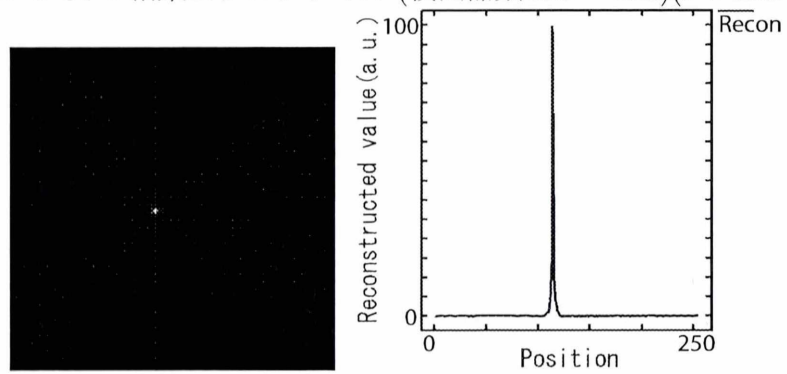


Fig. 3.138: # 128 の結果とプロファイル (検出器数  $320 \times 320$ )(FWHM=1.1pixel)

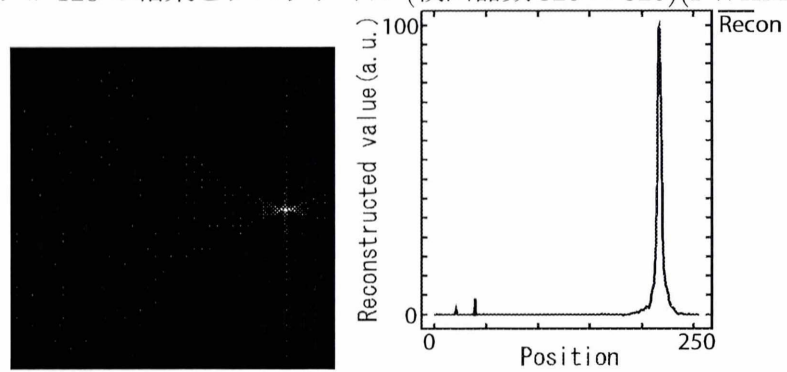


Fig. 3.139: # 192 の結果とプロファイル (検出器数  $320 \times 320$ )(FWHM=5.1pixel)

以下の Fig.3.140~145 にコリメータ数を 10, 30 に変化させた結果を示す.

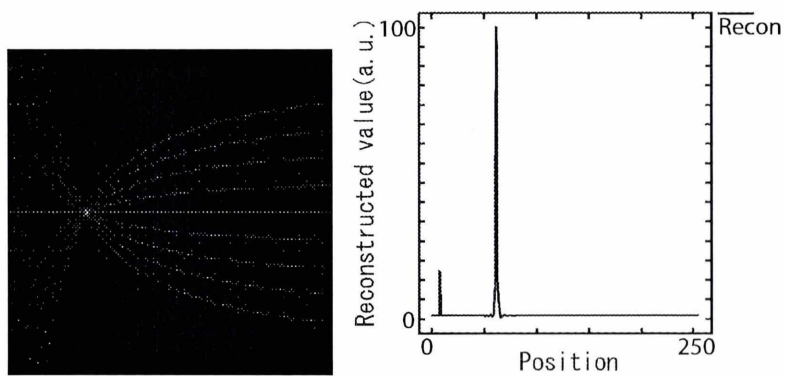


Fig. 3.140: # 64 の結果とプロファイル (コリメータ数  $10 \times 10$ ) (FWHM=1.7pixel)

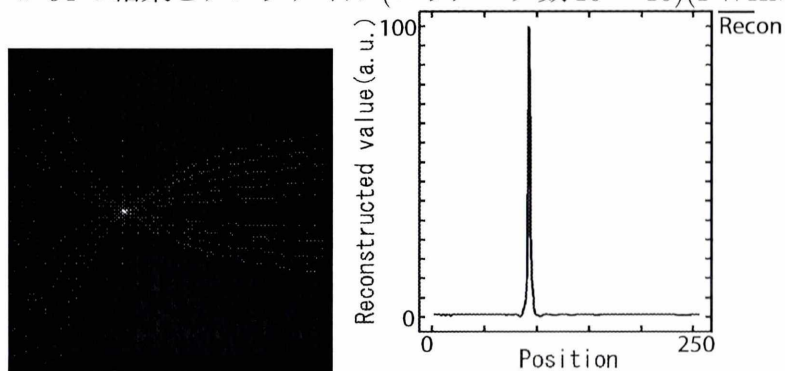


Fig. 3.141: # 128 の結果とプロファイル (コリメータ数  $10 \times 10$ ) (FWHM=2.8pixel)

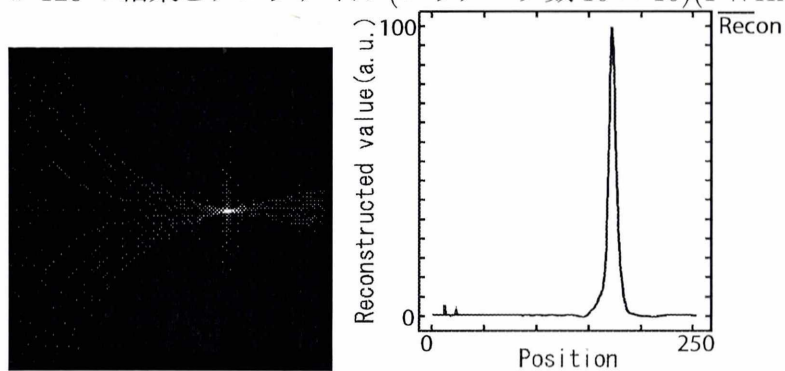


Fig. 3.142: # 192 の結果とプロファイル (コリメータ数  $10 \times 10$ ) (FWHM=7.9pixel)

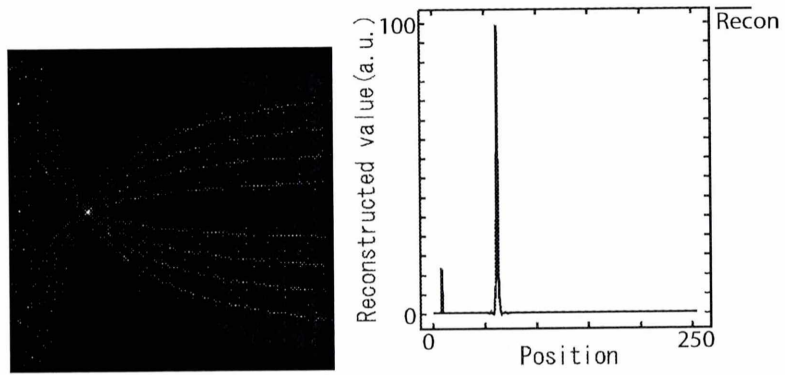


Fig. 3.143: # 64 の結果とプロファイル (コリメータ数  $30 \times 30$ ) (FWHM=1.7pixel)

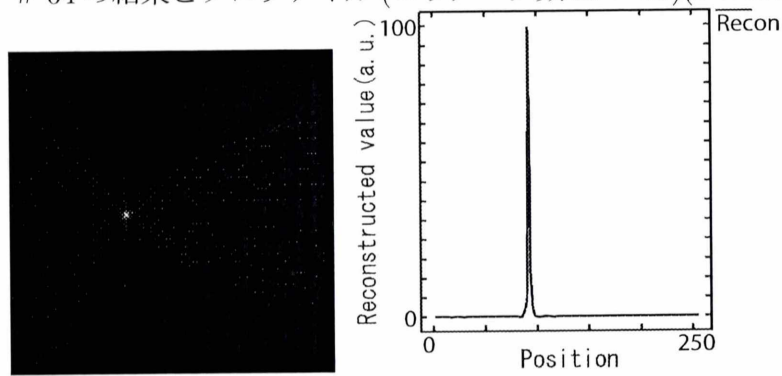


Fig. 3.144: # 128 の結果とプロファイル (コリメータ数  $30 \times 30$ ) (FWHM=1.7pixel)

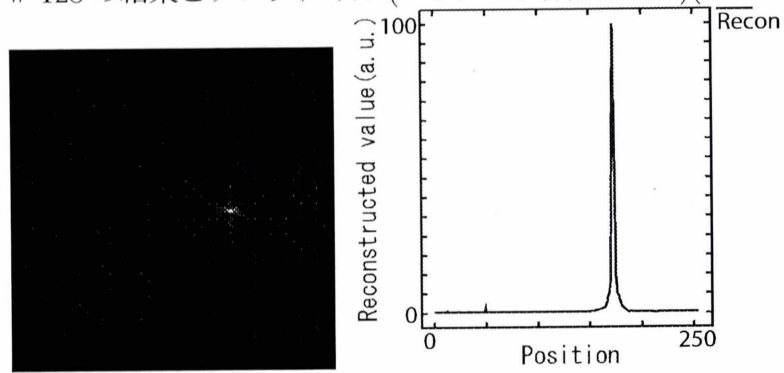


Fig. 3.145: # 192 の結果とプロファイル (コリメータ数  $30 \times 30$ ) (FWHM=3.4pixel)



以下の Fig.3.146~151 に  $z_0$  を 3.5, 8.0 に変化させた結果を示す.

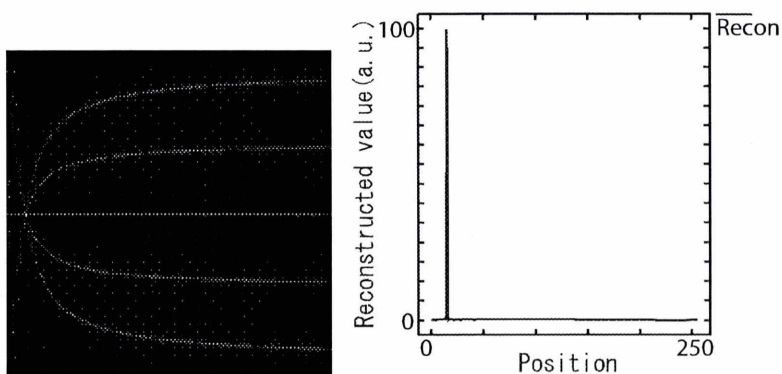


Fig. 3.146: # 64 の結果とプロファイル ( $z_0 = 3.5$ )(FWHM=1.1pixel)

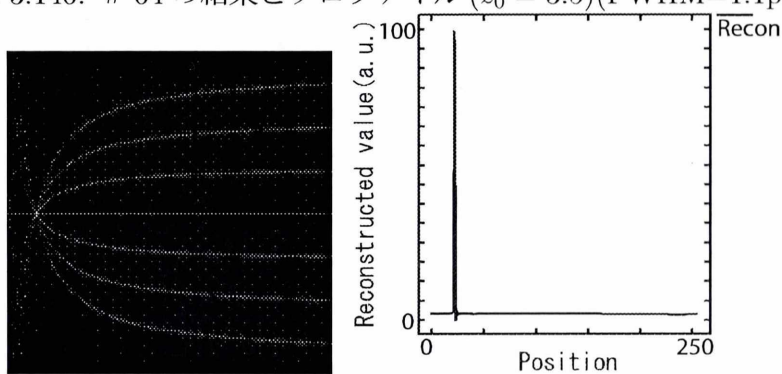


Fig. 3.147: # 128 の結果とプロファイル ( $z_0 = 3.5$ )(FWHM=1.1pixel)

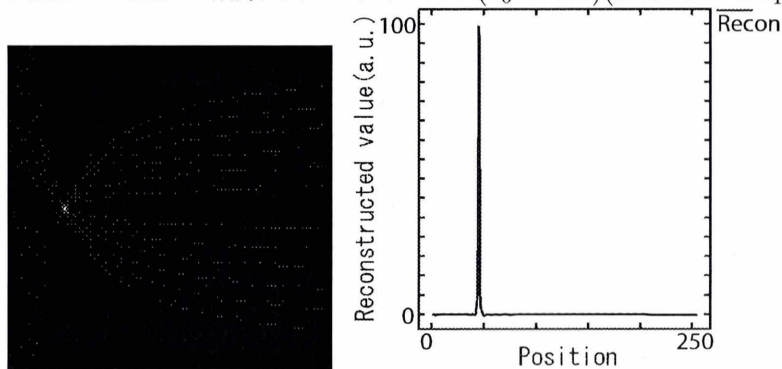


Fig. 3.148: # 192 の結果とプロファイル ( $z_0 = 3.5$ )(FWHM=1.1pixel)

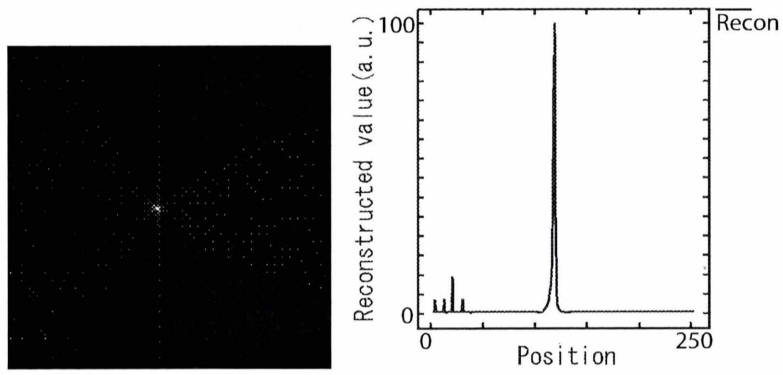


Fig. 3.149: # 64 の結果とプロファイル ( $z_0 = 8.0$ )(FWHM=1.7pixel)

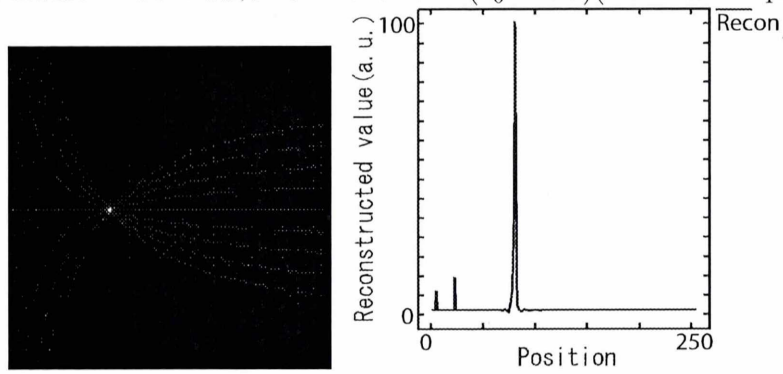


Fig. 3.150: # 128 の結果とプロファイル ( $z_0 = 8.0$ )(FWHM=2.3pixel)

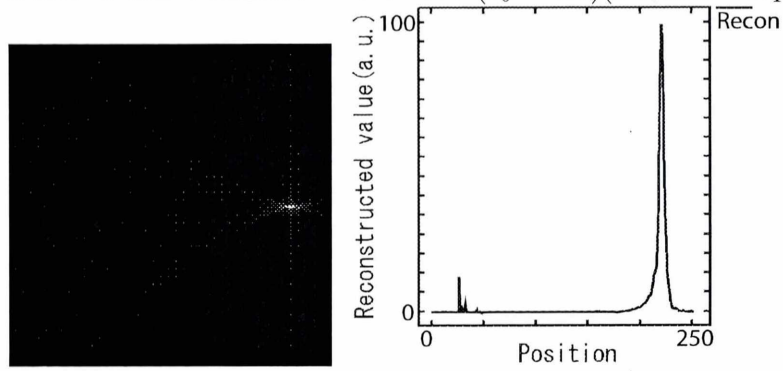


Fig. 3.151: # 192 の結果とプロファイル ( $z_0 = 8.0$ )(FWHM=4.5pixel)

以下の Fig.3.152~157 に  $z$  を 228, 242 に変化させた結果を示す.

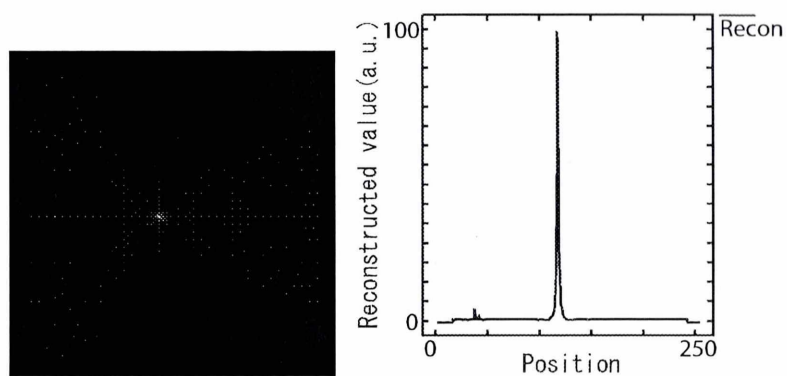


Fig. 3.152: # 64 の結果とプロファイル ( $z = 228$ )(FWHM=1.7pixel)

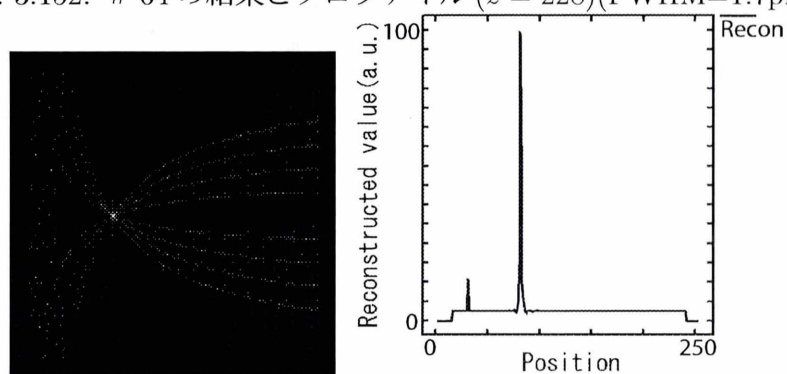


Fig. 3.153: # 128 の結果とプロファイル ( $z = 228$ )(FWHM=1.7pixel)

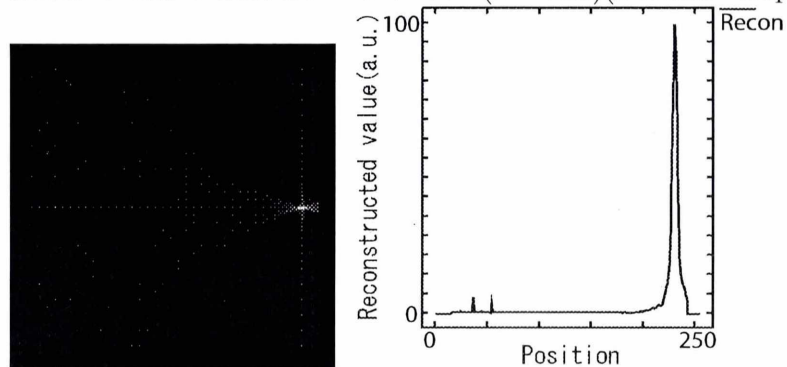


Fig. 3.154: # 192 の結果とプロファイル ( $z = 228$ )(FWHM=5.7pixel)

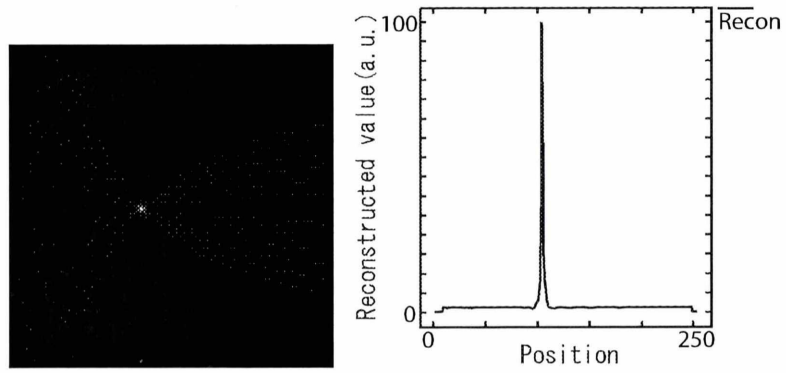


Fig. 3.155: # 64 の結果とプロファイル ( $z = 242$ )(FWHM=1.1pixel)

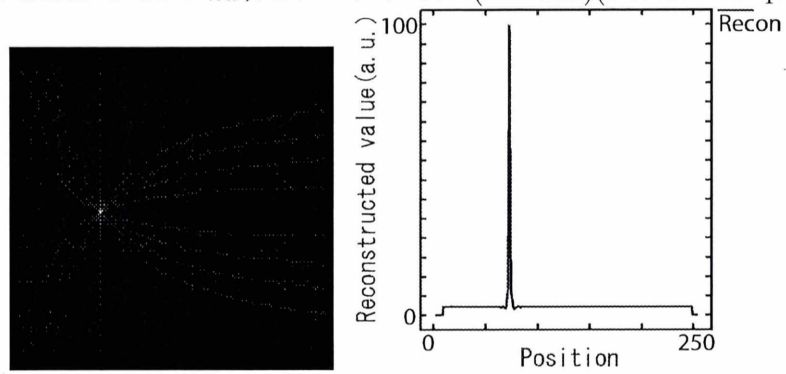


Fig. 3.156: # 128 の結果とプロファイル ( $z = 242$ )(FWHM=2.8pixel)

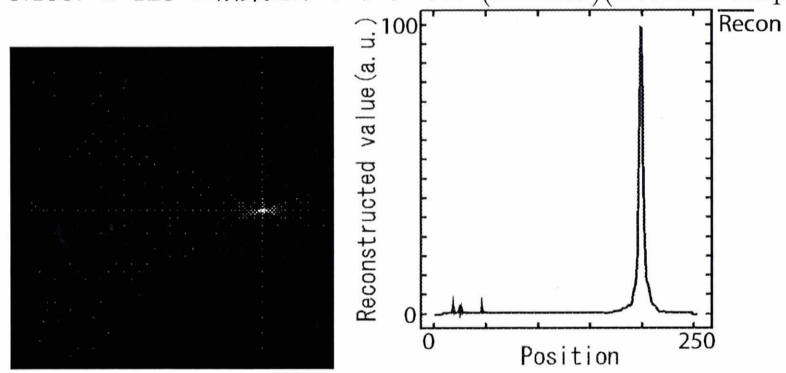


Fig. 3.157: # 192 の結果とプロファイル ( $z = 242$ )(FWHM=4.5pixel)

### 3.5 提案手法とピンホールバックプロジェクションとの比較

提案手法と同様の条件で単純ピンホールバックプロジェクションを行った。その結果と提案手法の結果、プロフィールを Fig.3.158 に示す。

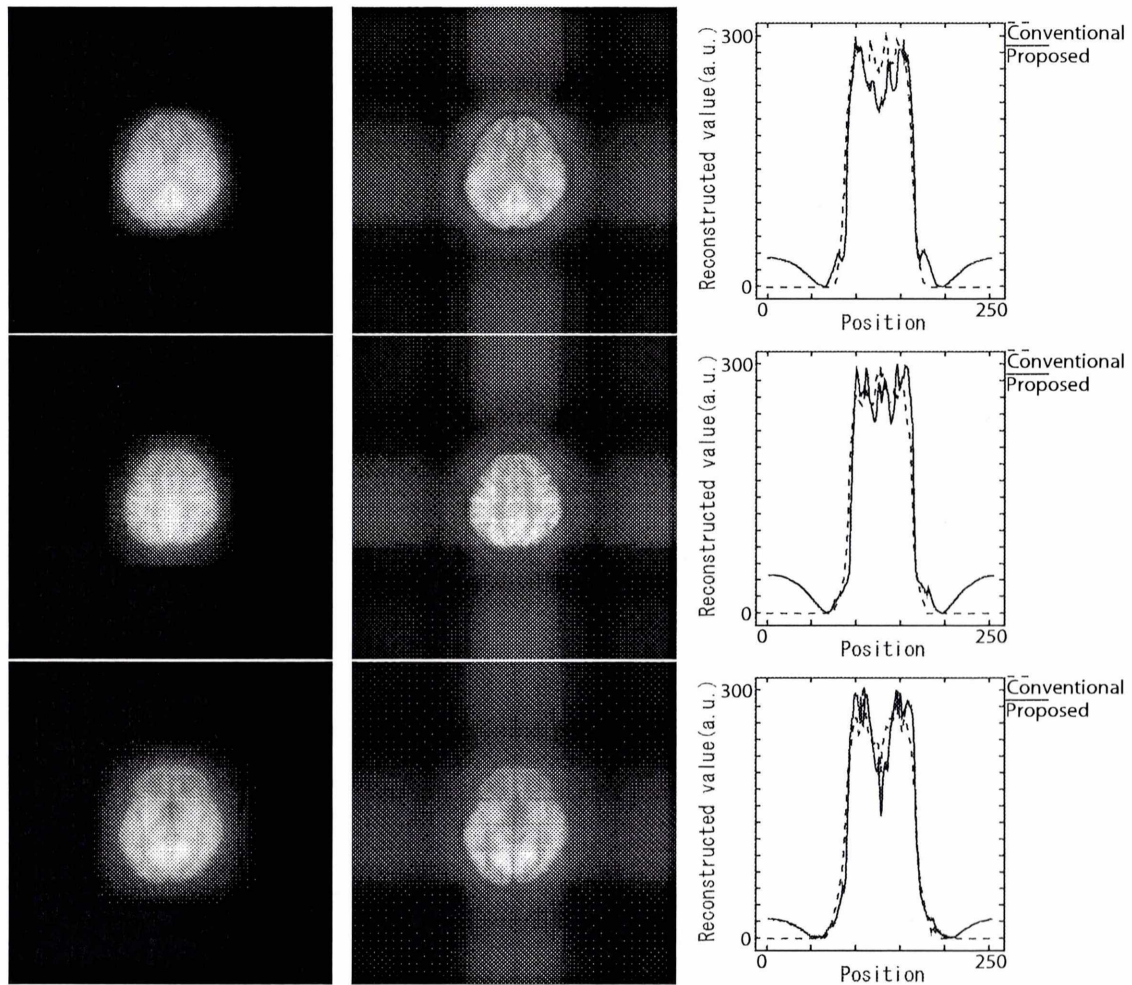


Fig. 3.158: 単純ピンホールバックプロジェクションとの比較 (左:ピンホールバックプロジェクション, 中:提案手法, 右:プロフィール)



## 第4章 考察

### 4.1 再構成結果に対する考察

2次元シミュレーションの結果を見ると、中心レイヤの幅や形状は再構成できているものの、検出器に近いレイヤでは形状が広がり、遠いレイヤでは縦方向に伸びてしまっている。また、投影線状のアーチファクトが発生している。これは、縦断層の投影により角度方向の周波数成分の欠落が起こるためだと思われる。原画像1の結果においては、元々の形状よりつぶれたような形になってしまっている。これはパラメータを変更することで調整可能であり、オブジェクトの大きさに合わせて適切なパラメータを設定が必要だということがわかる。

3次元シミュレーションの結果を見ると、再構成結果から画像の形状がしっかりと再構成できていることがわかる。また、プロファイルを見ても原画像におけるエッジを追従できていることがわかる。# 192の結果では# 128の結果より結果のボケがやや強いものの形状、エッジともに正確に再構成できている。しかし、原画像4の# 192の結果において結果画像に若干格子型のアーチファクトが発生している。これは、ピンホールの位置を格子状に配置したため発生したアーチファクトであると考えられる。これに対しては、サンプリングの位置を工夫することが必要と考えられる。本論文で取り扱っている手法は、投影経路の広がり具合が疑似逆行列を解く上での安定性と絡んできて結果に影響を及ぼすことが考えられる。これに対しては、疑似逆行列をほどこ際に、現状より安定性を向上させる正則化パラメータを用いたり、投影時の物体空間におけるパラメータを変化させることで解消できると思われる。また、# 192を再構成した結果においては、輪郭は再構成できているものの、輪郭部分の値が他のレイヤより小さく、分解能が若干落ちている。これは、投影過程で検出器から物体へ投影経路を伸ばす際、検出器から離れている部分のほうで各投影経路が広がるためと考えられる。

### 4.2 パラメータの変化に対する考察

パラメータを変化させた結果を見ると、基準として考えたパラメータにおける再構成画像より、全体的にコントラストが低下してしまっていることがわかる。また、パラメータによっては格子状のアーチファクトも強く出てしまっているものもある。周囲へのボケは基準のものより弱まっているものの、その代わりにコントラストが低下してしまっているので結果が有用であるとは言えない。このことから、適切なパラメータを選択して、再構成を行わないとコントラストの低下とアーチファクトの両方が発生してしまう可能性があることがわかる。



### 4.3 点ファントムにおける FWHM に対する考察

それぞれの FWHM に対してまとめた表を、 $xy$  平面に対するものを Table 4.1 に、 $zx$  平面に対するものを Table 4.2 に示す。 $xy$  平面に対する結果ではほとんどの FWHM が 2.3pixel と良好な結果となった。 $xy$  平面に対する分解能はかなり高精度であるといえる。また、 $zx$  平面に対する結果も、基準として使ったパラメータに対しては良好な結果といえる。従来、縦方向の伸びが強くなってしまいう縦断層に対して本手法が有用であることが分かった。しかし、パラメータを変化させることで縦方向の伸びが強くなってしまいうものもあるため、適切なパラメータを考慮することが重要であることがわかる。また、基準として使ったパラメータより FWHM が小さくなったパラメータ ( $z_0 = 3.5$ ) もあるが、再構成されるスライドの位置が上に偏ってしまうため、形状が正確に再構成できているとはいえないパラメータである。

Table 4.1:  $xy$  平面における FWHM

スライドナンバー	64	128	192
基準値	2.3	2.3	2.3
検出器数 $294 \times 294$	2.3	2.3	2.3
検出器数 $320 \times 320$	2.3	2.3	2.3
コリメータ数 $10 \times 10$	2.3	2.3	2.3
コリメータ数 $30 \times 30$	2.3	2.3	2.8
$z_0 = 3.5$	2.3	2.3	2.3
$z_0 = 8.0$	2.3	4.0	2.3
$z = 228$	2.3	2.3	2.3
$z = 242$	2.3	2.3	2.3

Table 4.2:  $zx$  平面における FWHM

スライドナンバー	64	128	192
基準値	1.1	1.7	4.0
検出器数 $294 \times 294$	1.1	1.7	4.5
検出器数 $320 \times 320$	2.3	1.1	5.1
コリメータ数 $10 \times 10$	1.7	2.8	7.9
コリメータ数 $30 \times 30$	1.7	1.7	3.4
$z_0 = 3.5$	1.1	1.1	1.1
$z_0 = 8.0$	1.7	2.3	4.5
$z = 228$	1.7	1.7	5.7
$z = 242$	1.1	2.8	4.5

## 4.4 点ファントムにおけるスライドナンバーの変化に対する考察

再構成後のスライドナンバーの変化をまとめた表を Table 4.3 に示す。結果から、コリメータ数の変化は再構成後のスライドの位置に寄与していないことがわかる。また、全体的に上部のスライドは原画像より間隔が縮まり、下部のスライドは原画像より間隔が広まる傾向にある。検出器数を増加させると、全体的に下に再構成され間隔も広がってしまっている。このことから、単純に検出器を増やしても効果がないことがわかる。 $z_0$  の変化に対しては小さくすると間隔が縮まり、上側に再構成され、大きくすると間隔が広がり、下側に再構成されることがわかる。検出器数の変化に対するスライドナンバーの変化と合わせて考えると、検出器数の変化に対する再構成領域の変化に対して  $z_0$  を変化させることである程度影響を緩和できることが考えられる。 $z$  に対しても同様に  $z$  の値を小さくすればするほど下側に再構成領域が伸びていることがわかる。以上のことから、条件を変化させる際は、検出器数、 $z_0$ 、 $z$  の値を調整して再構成領域を調整する必要があることがわかる。

Table 4.3: 再構成後の各パラメータにおけるスライドナンバーの変化

元々のスライドナンバー	64	128	192
基準値	63	93	176
検出器数 $294 \times 294$	72	105	201
検出器数 $320 \times 320$	78	116	218
コリメータ数 $10 \times 10$	63	93	176
コリメータ数 $30 \times 30$	63	93	176
$z_0 = 3.5$	16	24	46
$z_0 = 8.0$	81	121	225
$z = 228$	82	118	231
$z = 242$	73	105	201

## 4.5 ピンホールバックプロジェクションとの比較に対する考察

結果から、提案手法は従来手法と比べて、コントラスト、分解能ともに向上していることがわかる。このことから本手法が従来手法と比べて有用であることがわかる。しかし、本手法のほうが周囲へのボケやレイヤが深い位置で格子状のアーチファクトが発生してしまっている。周囲へのボケは広がっているもののオブジェクトとの間にはっきりとしたコントラストがみられるため、許容できるものとする。また、格子状のアーチファクトは中心スライドにおいては全く見られないため、注目スライドを固定して本手法を適用することで解消できると考えられる。

## 第5章 まとめ

本論文では、特定方向の空間周波数が欠落してしまう縦断層イメージングに対して、疑似逆行列を用いた解析的手法による3次元オブジェクトに対するアルゴリズムとそのシミュレーション結果を提示した。結果として、対象レイヤにおいて画像の形状は高精度かつ高分解能で再構成することができ、本手法の有用性を実証することができた。

# 謝辞

本研究にあたり、全般に渡ってご指導をいただきました尾川浩一教授、および尾川浩一研究室の皆様へ感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Harrison H. Barrett, William Swindell: Radiological Imaging The Theory of Image Formation, Detection, and Processing, Volume 2, New York, 1981
- [2] Grant D. G. : Tomosynthesis: A Three dimensional radiographic imaging technique, IEEE Biomed. Trans. 19, 20-28, 1972
- [3] D. T. Wilson, G. D. DeMeester, H. H. Barrett, et al. : A New Configuration for Coded Aperture Imaging, Raytheon Research Division, Waltham, Massachusetts, 02154, USA, 1973
- [4] 岩田 敏, 中島 真人, 油田 信一, 尾川 浩一: ガンマカメラを用いた縦断層型 ECT, 電子通信学会論文誌, Vol.J68-D No11,1985
- [5] 岡本 良夫: 逆問題とその解き方, オーム社, 東京, 1992