

透明単結晶シンチレータGAGGの導入による 高分解能中性子ラジオグラフィの実現

伊勢川和久¹, 栗田圭輔¹, 瀬戸山大吾², 篠原武尚¹

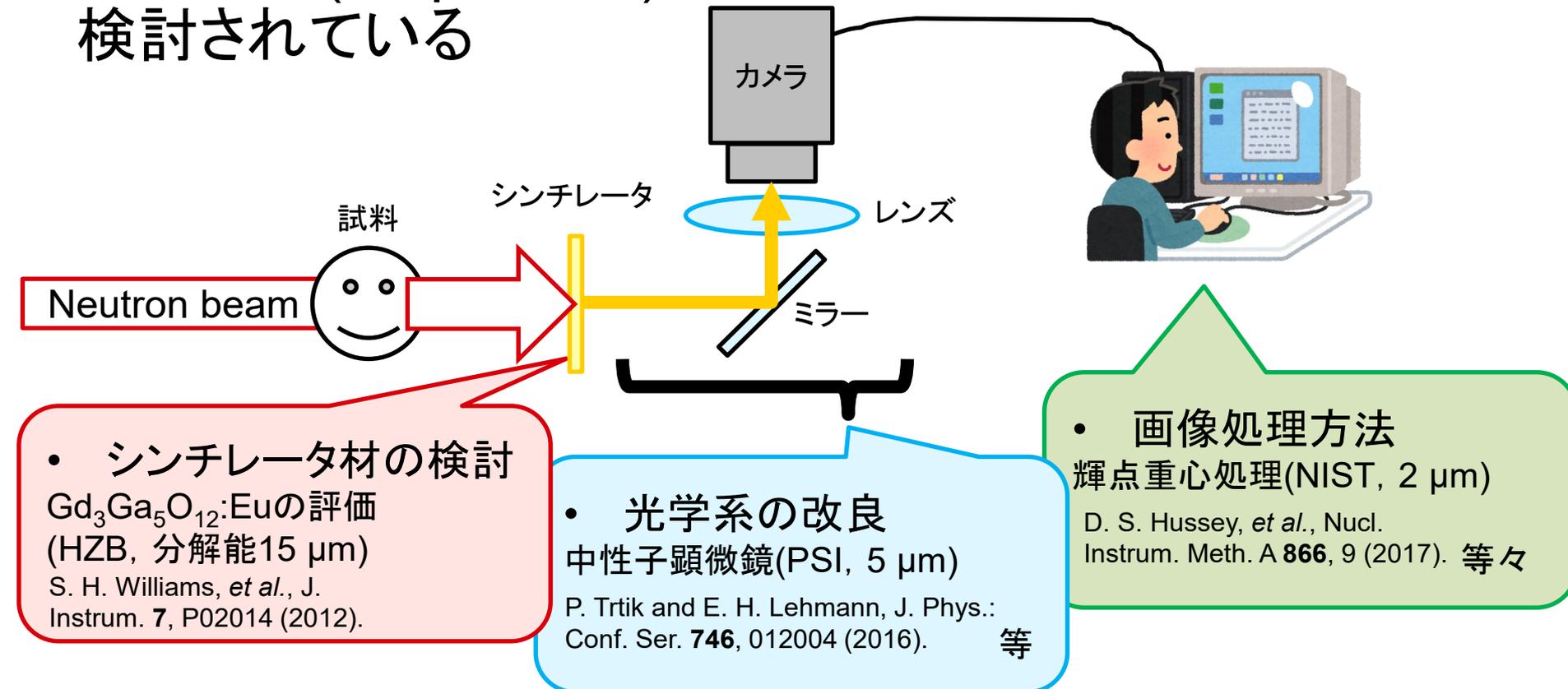
1 日本原子力研究開発機構

2 豊田中央研究所



高分解能中性子ラジオグラフィ

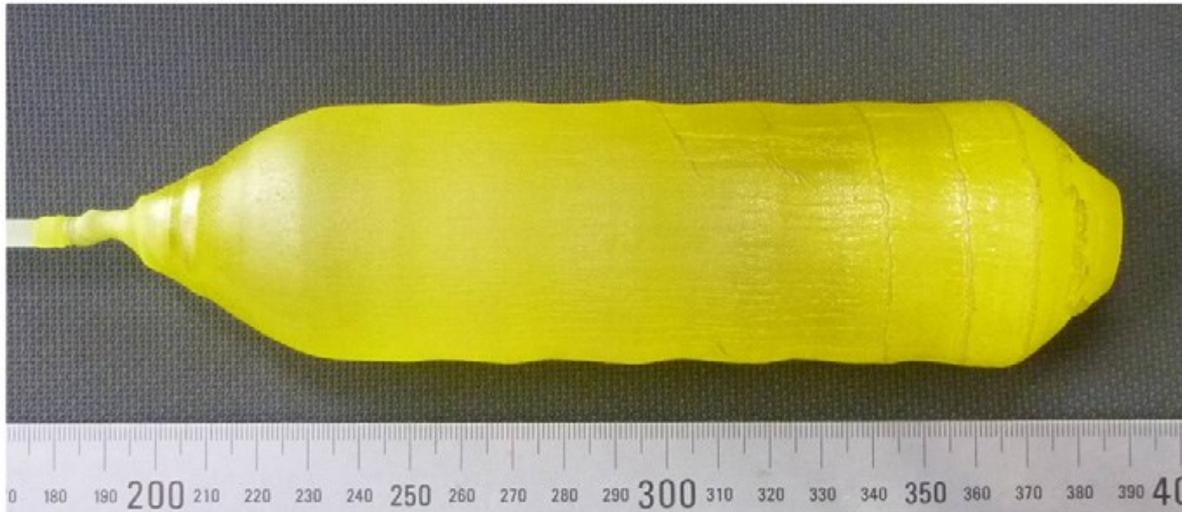
- 中性子ラジオグラフィはX線ラジオグラフィに対して、元素感度等について相補的であるが分解能で大きく劣る
- 高分解能(10 μm 以下)実現のために様々なアプローチが検討されている



➤ *Operando*測定や高速CTを念頭に、分解能と撮像速度を両立させられるシンチレータ材の改良に着目

目的

- ◆ CMOSカメラを用いてSiemens Starを撮像し、 $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (GAGG:Ce)シンチレータの評価を行う
- GAGG: X線向けに開発された透明な単結晶シンチレータであり光の散乱が少ないため、厚くても高分解能が期待できる K. Kamada, et al., J. Cryst. Growth 352, 88 (2012).
- SPring-8の豊田ビームラインで使用している撮像系を中性子へ応用し、高分解能化を図る
- GAGGの中性子ラジオグラフィへの適用は世界初



GAGG単結晶.

実験

- 簡単な遮蔽を組み, 倍率とL/Dを変えて3種のシンチレータを比較評価

@BL22 RADEN in J-PARC MLF

中性子波長: 1.50~6.48 Å

CMOSカメラ(ORCA Flash4.0-V3, 浜ホト)

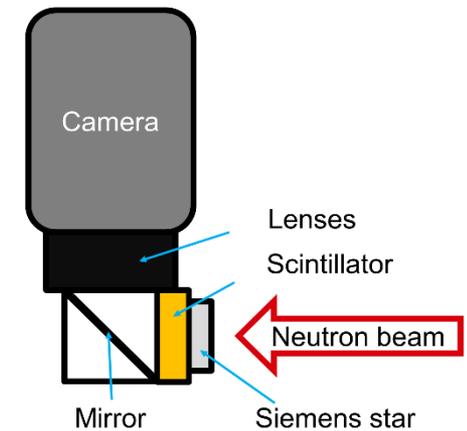
シンチレータ

- P43 ($Gd_2O_2S:Tb$) (10 μm 厚)
- GAGG (100 μm 厚)
- GAGG (10 μm 厚)



シンチレータ+
Siemens Starターゲット

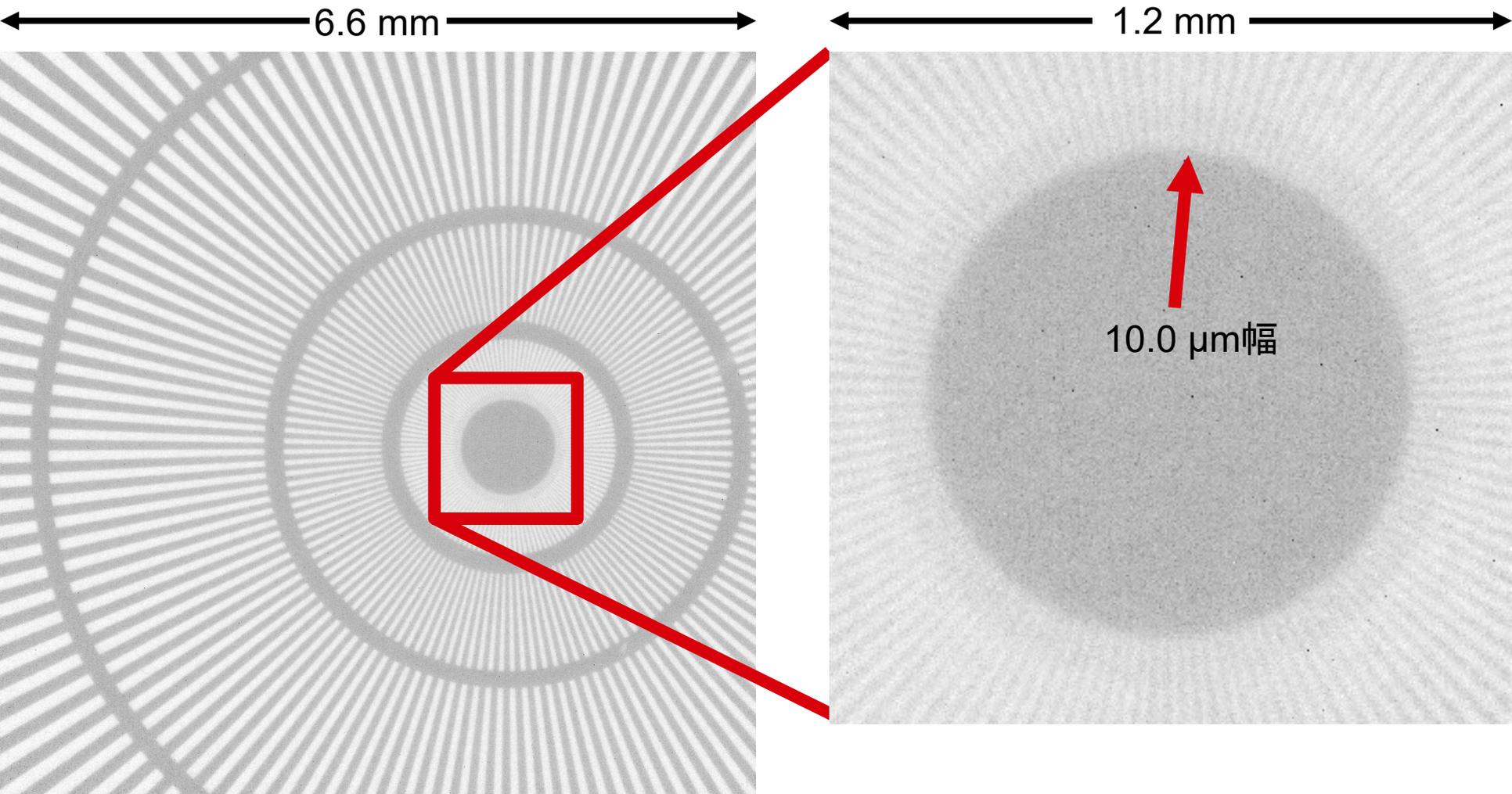
倍率		1×		2×	
L/D		230	400	180	300
Neutron flux (n/s/cm ²)		1.0×10^7	3.4×10^6	1.7×10^7	6.1×10^6
撮像 時間	P43 (10 μm)	10 sec × 90	10 sec × 180	10 sec × 90 (15 min)	10 sec × 180 (30 min)
	GAGG (100 μm)	(15 min)	(30 min)		
	GAGG (10 μm)				



セットアップ概観.

結果-目視

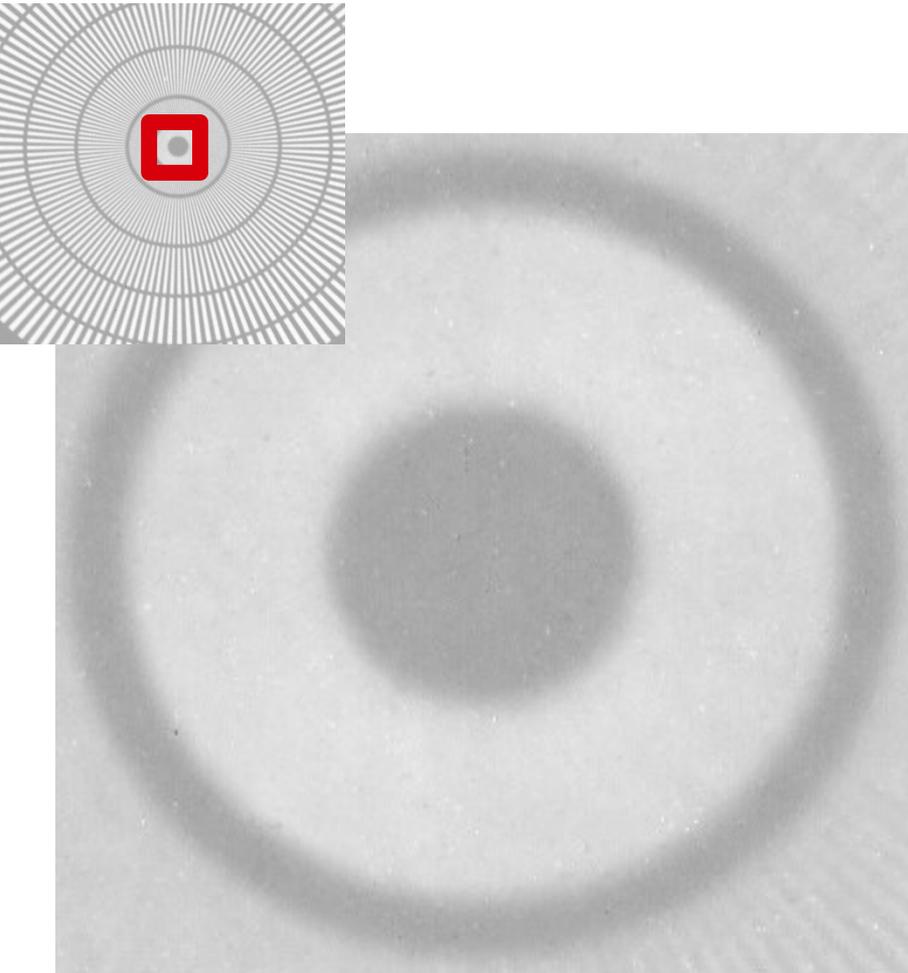
- 多くの条件で一番内側の10.0 μm 幅の間隙が観測できた



100 μm GAGG, 2倍, L/D=300の測定結果.

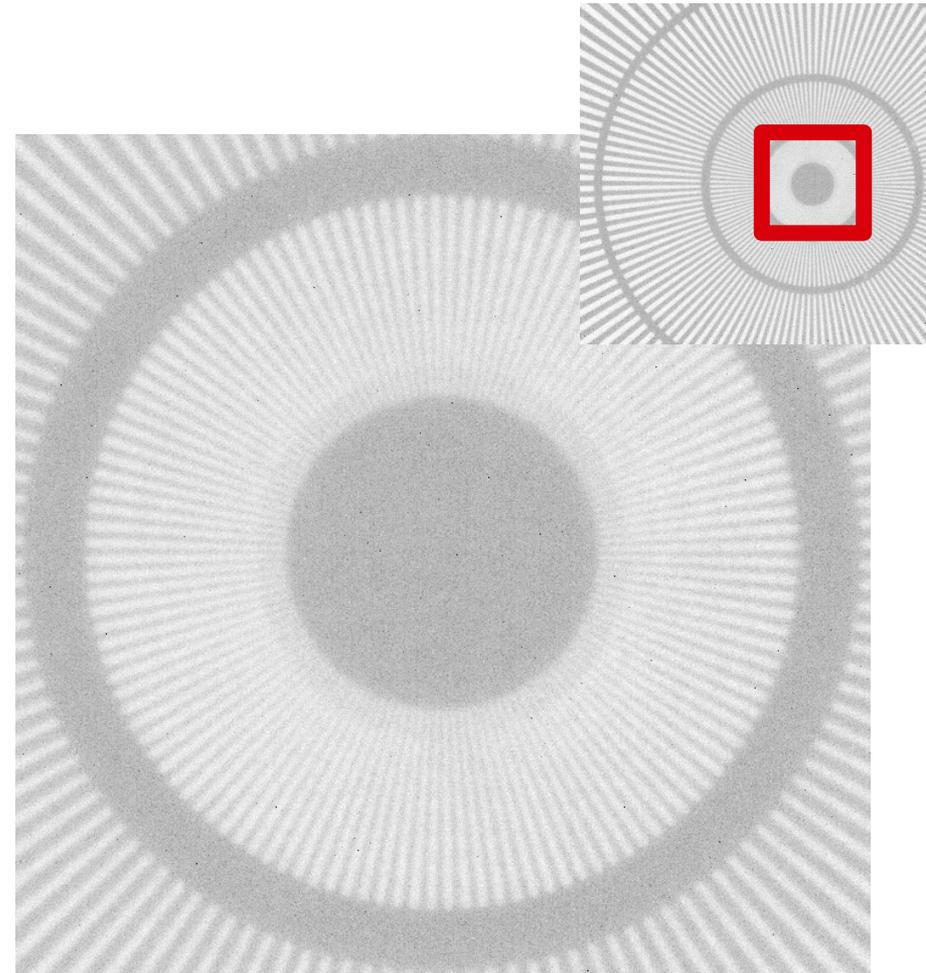
従来のRADENの結果との比較

- 以前の測定系による結果と比較すると圧倒的な高分解能を実現できた



CCD, 30 μm P43, $\times 1$,
L/D=400, 撮像時間33分.

2.3 mm

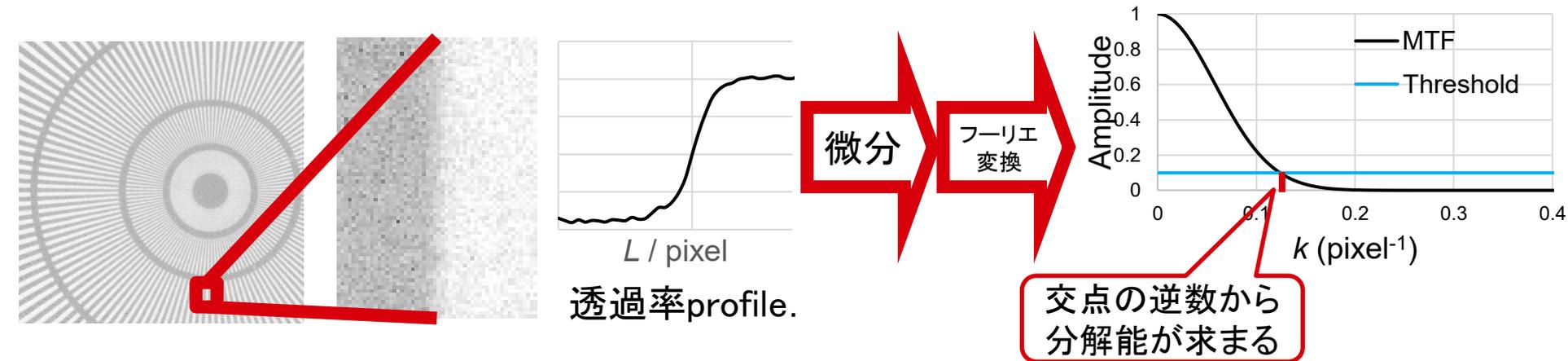


CMOS, 100 μm GAGG, $\times 2$,
L/D=300, 撮像時間30分.

分解能評価方法

① MTF (Modulation Transfer Function)分解能

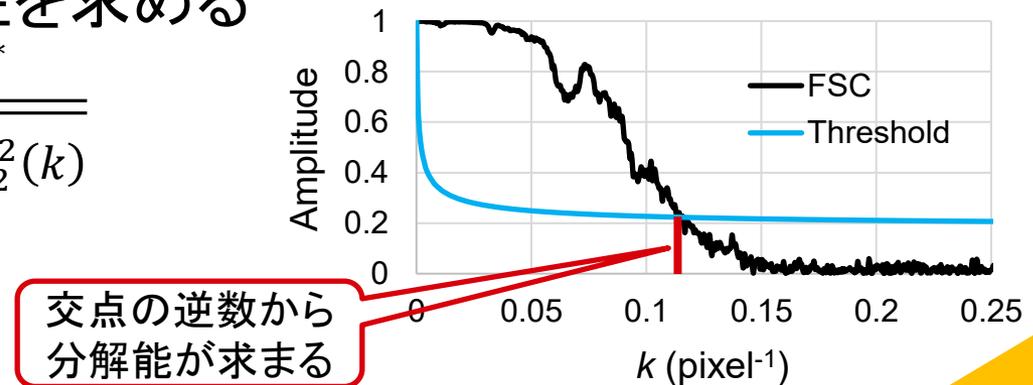
- 画像のコントラストから分解能を算出



② FRC (Fourier Ring Correlation)分解能

- 同じ測定を2回行ってそれぞれ規格化後フーリエ変換し, 振幅の相関を算出して画像の信頼性を求める

$$FSC(k_i) = \frac{\sum_{r \in r_i} F_1(k) F_2(k)^*}{\sqrt{\sum_{r \in r_i} F_1^2(k) \sum_{r \in r_i} F_2^2(k)}}$$



結果-分解能

- 分解能10 μm を切りつつある他施設に追いつく数値を実現

2倍, L/D=300の分解能.

	Resolution / μm	
	MTF	FRC
P43 (10 μm)	13.8	14.2
GAGG (100 μm)	10.5	14.1
GAGG (10 μm)	11.7	13.7
P43 (30 μm) (1倍, L/D=400)	35.9	28.1

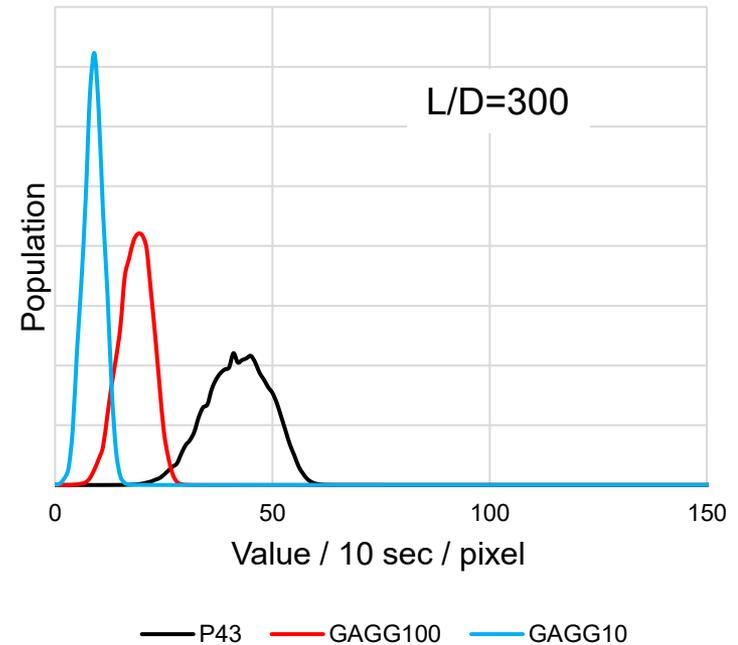
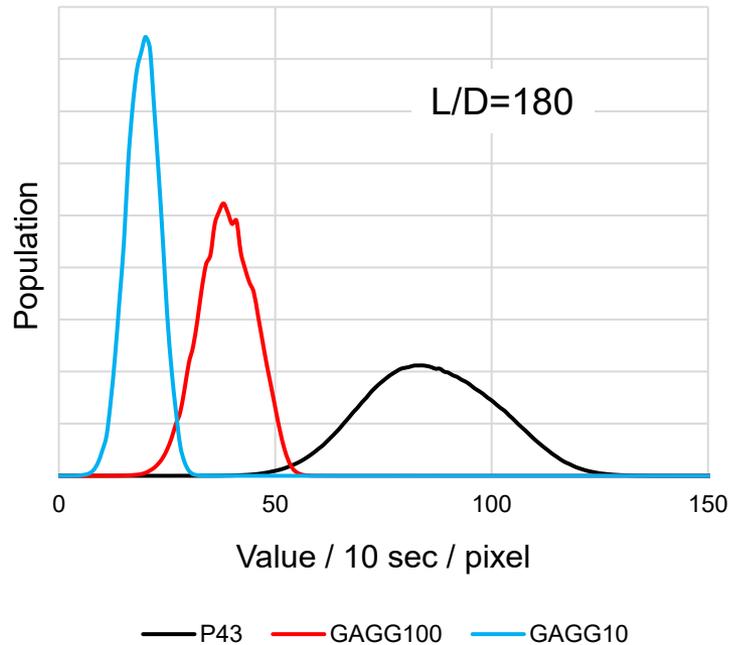
他施設の分解能.

	Resolution / μm
ISIS/IMAT	18 (MTF)
LANL ERNI	11 (MTF)
HZB CoNRad	7.4 (MTF)
PSI (microscope)	5.4 (FRC)
NIST (重心計算)	2 (その他)

- 100 μm 厚のGAGGが最も良い分解能を示した
- 中性子顕微鏡や重心計算とはまだ隔たりがある

シンチレータごとの輝度分布(2倍)

- ダイレクトビームからバックグラウンドを差し引いてヒストグラムを算出



ダイレクトビームの輝度分布.

ピーク位置 : P43:GAGG100:GAGG10 \approx 4:2:1

透過率(%) : P43:GAGG100:GAGG10 \approx 31:0.16:52

➤ GAGGの組成の調整によりS/B比をもっと大きくしたい

まとめと展望

- 簡易な測定システムを用いて10 μm の分解能を実現した
- 透明単結晶のGAGGは光の散乱が小さいため、従来のP43に比べ厚くても高分解能を示した
- 同位体Gdを用いない安価な高分解能撮像の可能性が開けた
- GAGGの組成を中性子用に調整することで、中性子顕微鏡や重心計算に迫る分解能が実現できるだろう

撮像系の具体的な改良

- GAGGの高輝度化

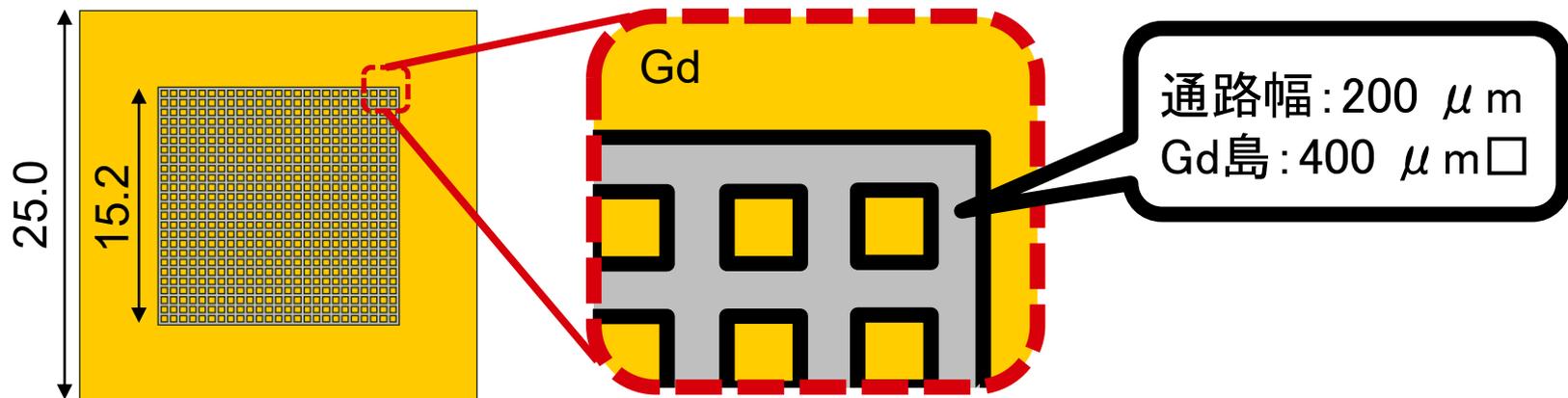
GAGGを開発した東北大学のグループと共同開発中

- 光学系の改良

ピント調節機構の開発, 高倍率レンズの導入,
光IIの導入, 高輝度光学系の導入

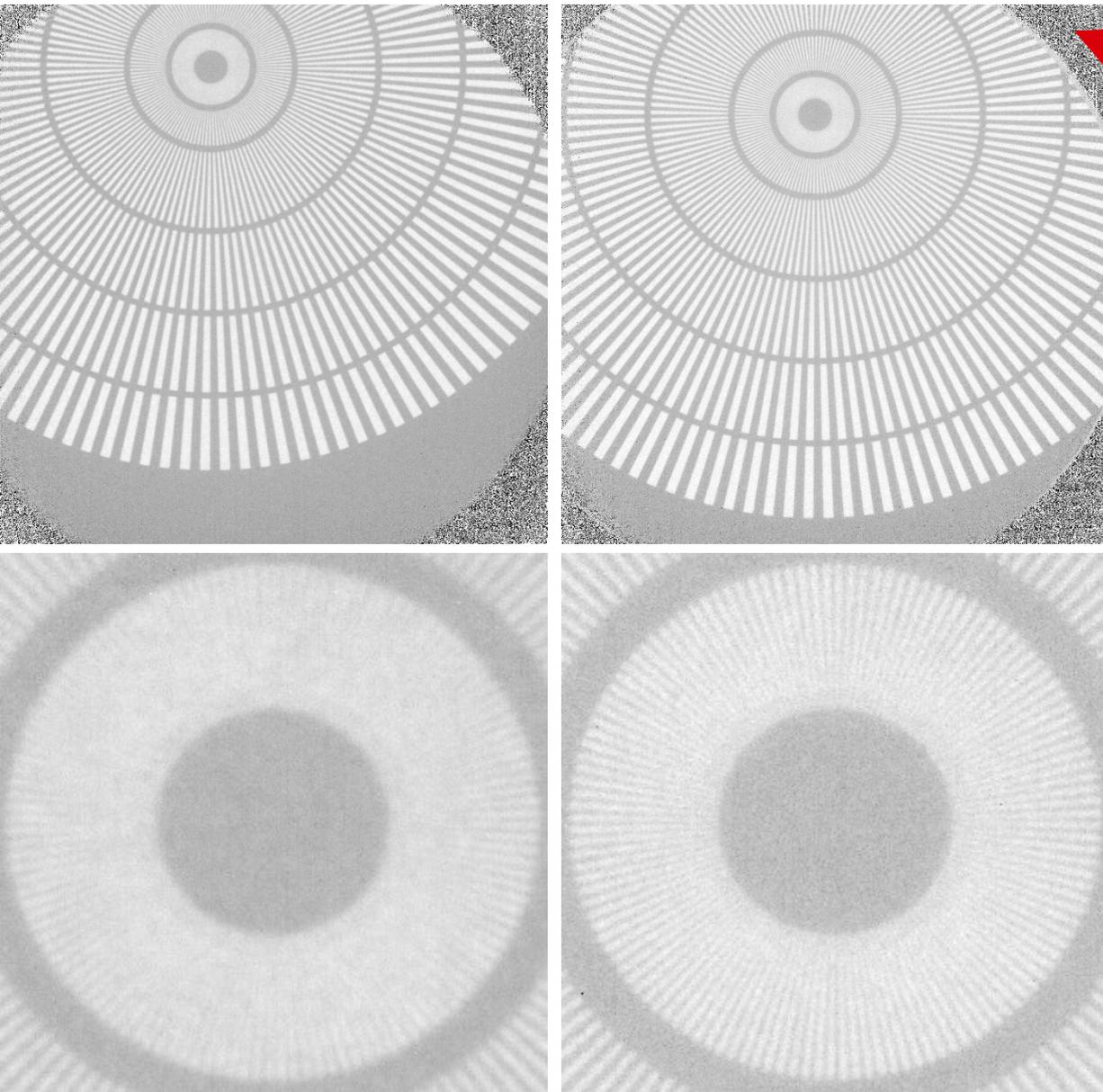
- 分解能評価方法の改良

分解能とレンズ収差を同時に観察できる格子状のインジケータを設計



ご清聴ありがとうございました

結果-条件による比較-1倍OPEN1 (L/D=230)



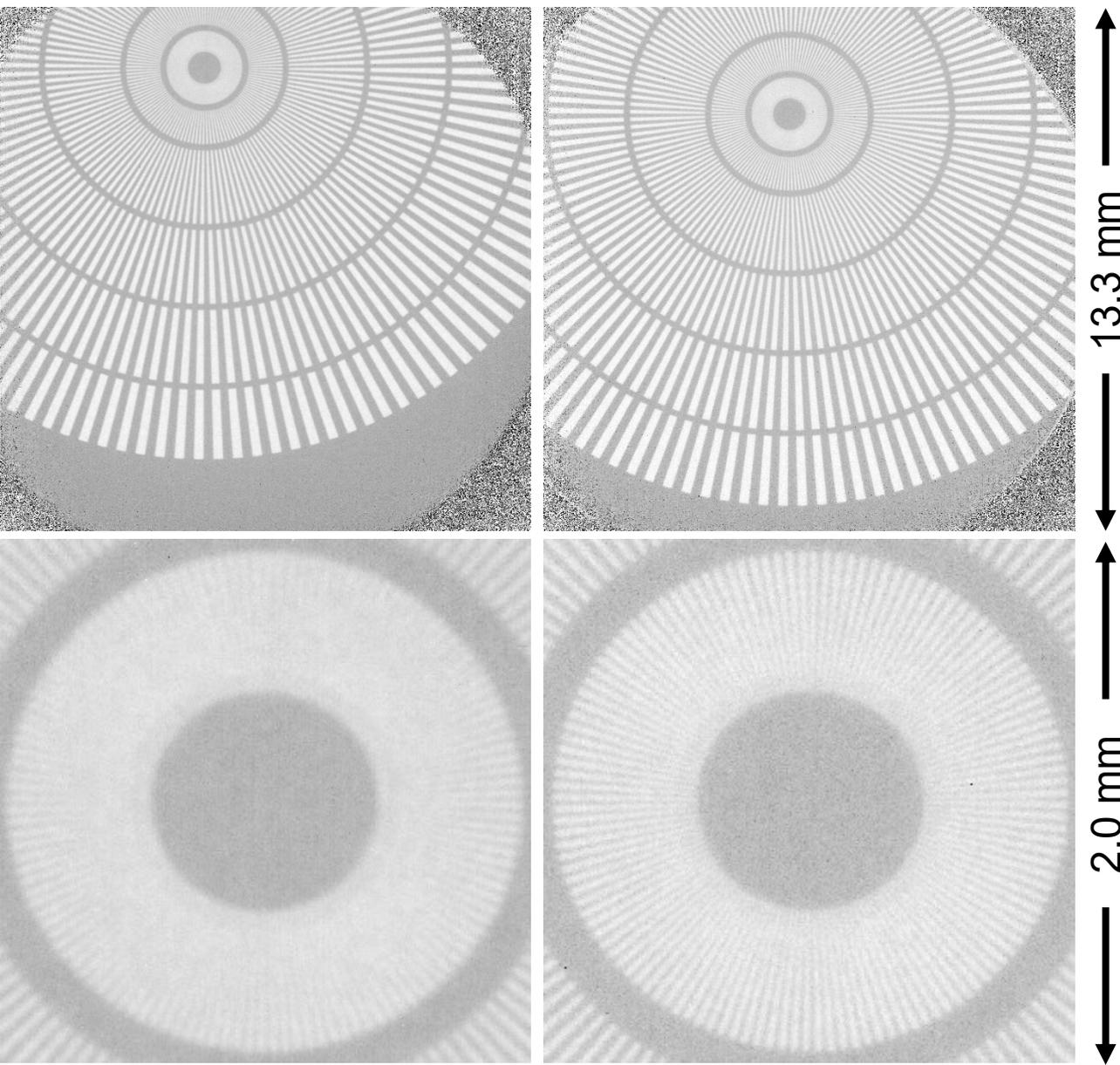
13.3 mm
2.0 mm

シンチレータの直径
16 mmの範囲外

10 μm GdOx.

100 μm GAGG.

結果-条件による比較-1倍OPEN2 (L/D=400)



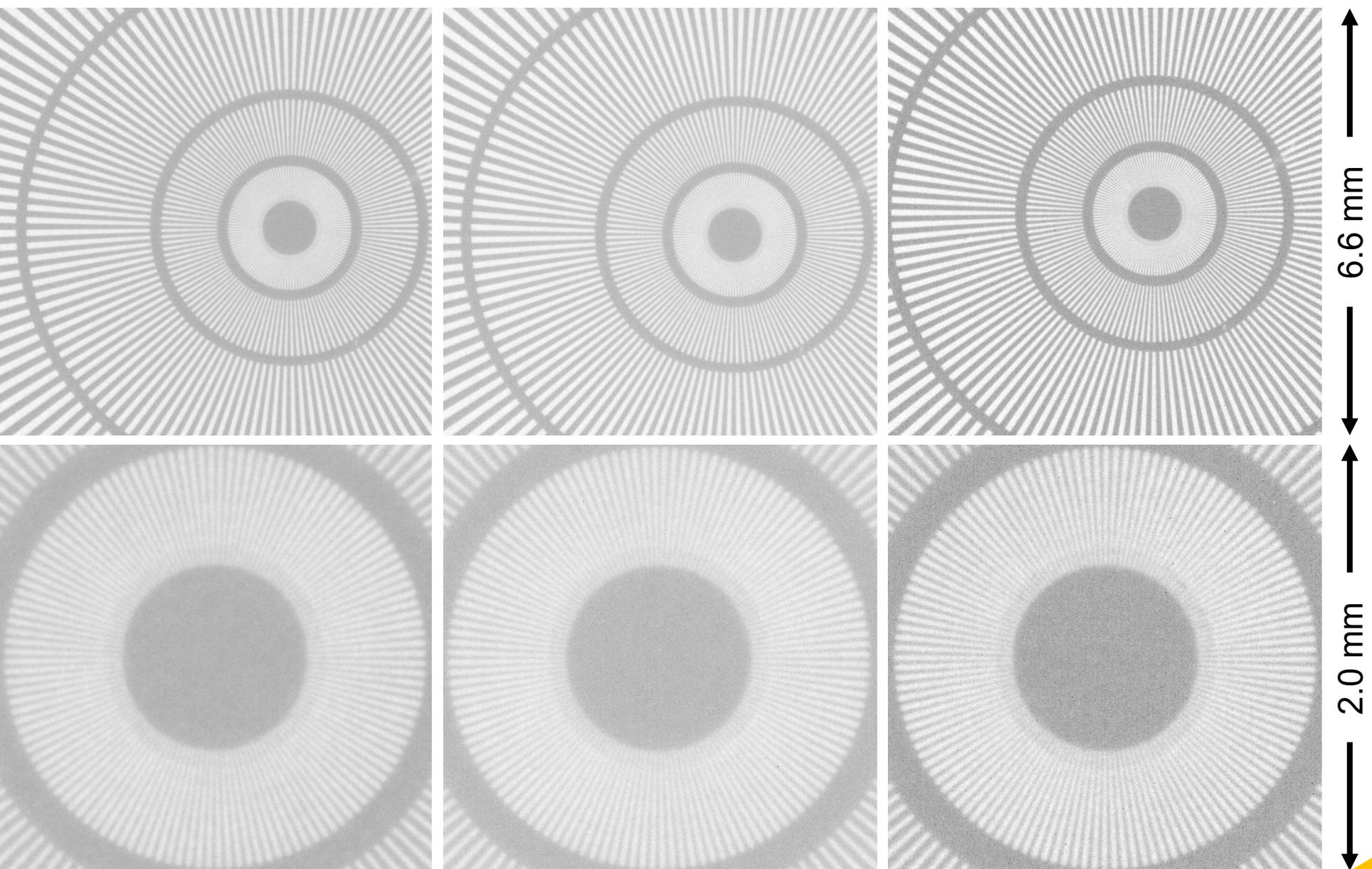
13.3 mm

2.0 mm

10 μm GdOx.

100 μm GAGG.

結果-条件による比較-2倍OPEN1 (L/D=180)



10 μm GdOx.

100 μm GAGG.

10 μm GAGG.

6.6 mm
2.0 mm

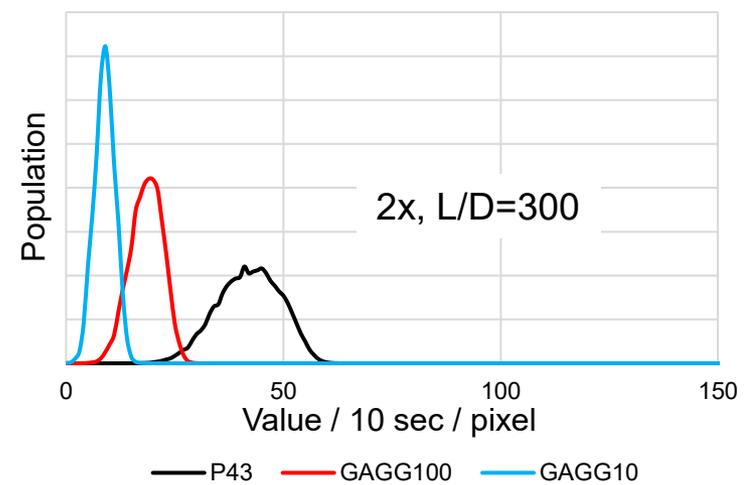
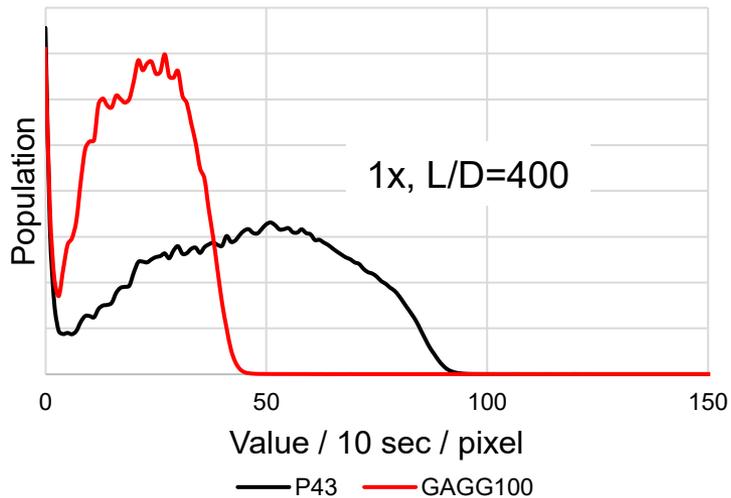
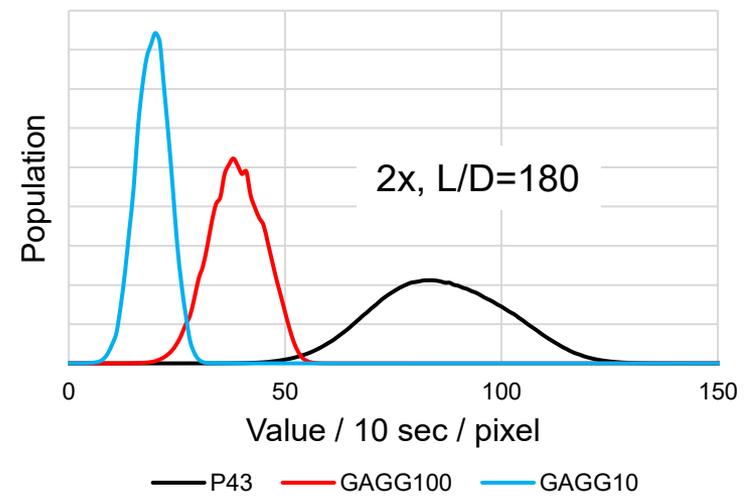
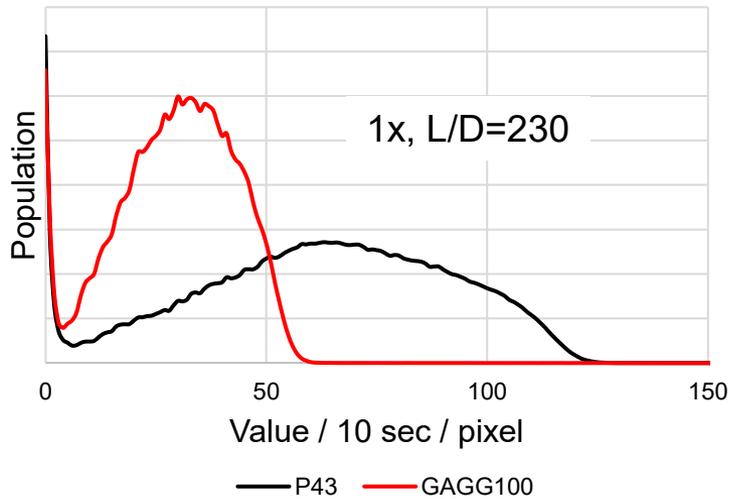
分解能の算出

- FRCの方がMTFよりやや大きい値を与える

Magnification	1				2			
	230		400		180		300	
L/D								
Method	MTF	FRC	MTF	FRC	MTF	FRC	MTF	FRC
P43 (10 μm)	23.8	29.9	25.5	30.8	12.9	13.9	13.8	14.2
GAGG (100 μm)	16.6	24.9	15.0	24.2	13.0	13.8	10.5	14.1
GAGG (10 μm)					12.6	13.6	11.7	13.7

※単位はすべて μm . ※pixelと実長はCMOSの素子の大きさ6.5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ を用いて変換.

シンチレータごとの輝度分布



ダイレクトビームの輝度分布.

ピーク位置 : P43:GAGG100:GAGG10 \approx 4:2:1

- 1倍ではシンチ外のピクセルの影響が0輝度に現れている