

# MRIシミュレータによる QRAPMASTERシーケンスの実装と評価

巨瀬勝美, 巨瀬亮一

(株) エムアールアイシミュレーションズ

# はじめに：定量MRI

---

MRIの通常の臨床画像（T1W, T2W, PDW, FLAIRなど）の画素強度には、定量性がないため、多施設共同研究や縦断的症例研究には、 $T_1$ や $T_2$ の定量を可能とする**定量MRI**（**QPM** : Quantitative Parameter Mapping）が必要とされている。

ところが、日常的な臨床撮像に組み込むためには、撮像時間を始めとした多くの問題があった。

# はじめに：QRAPMASTERとその問題点

---

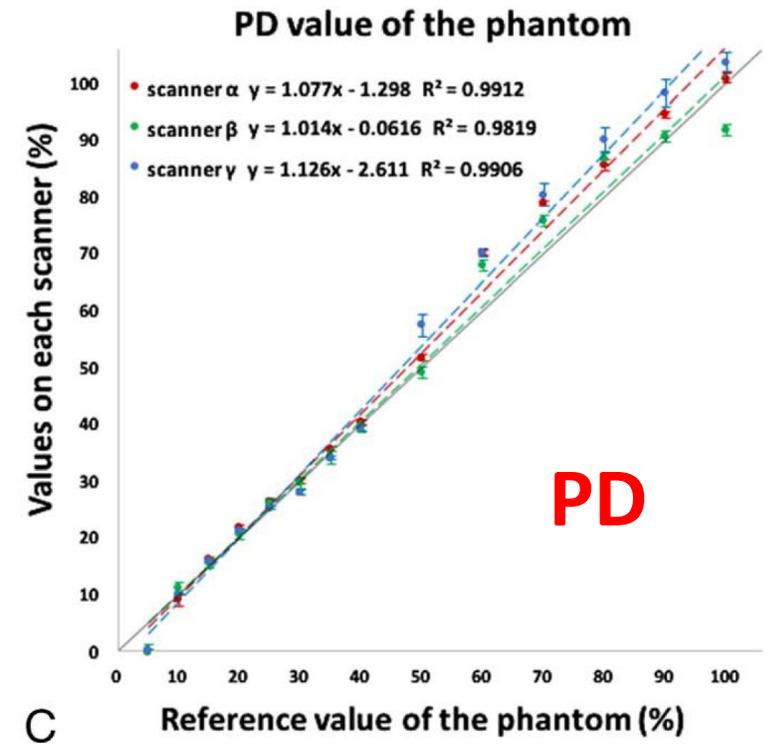
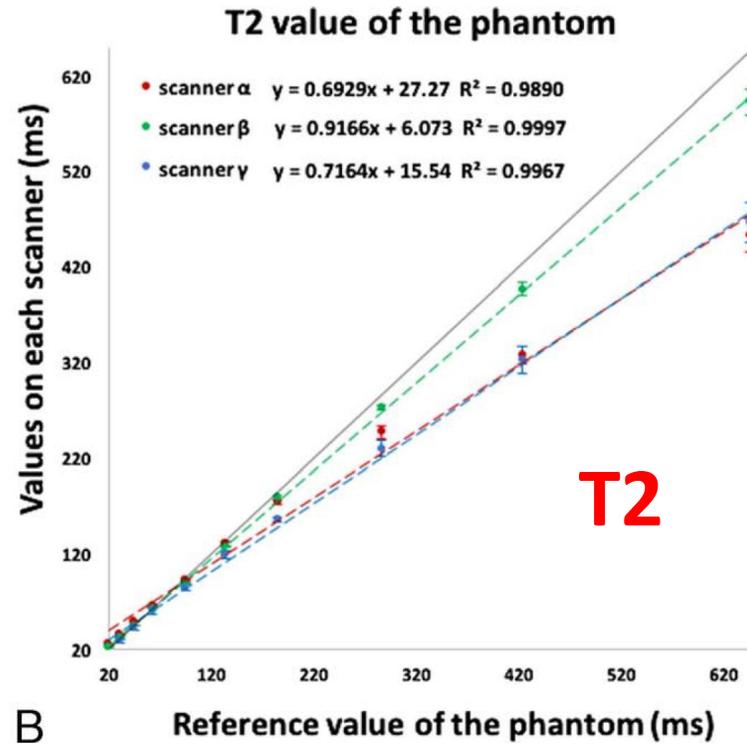
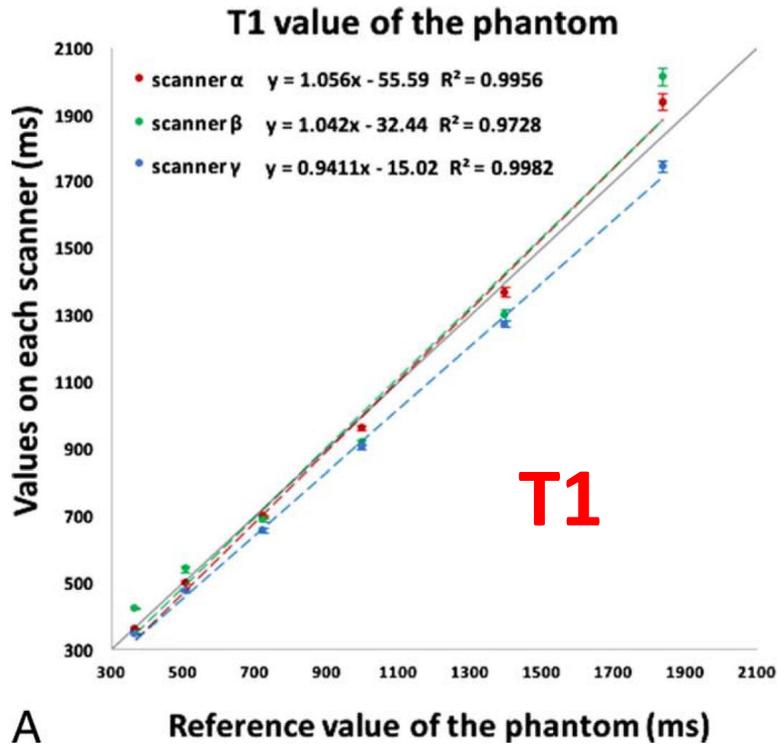
これに対し提案された**QRAPMASTER**法は，マルチスライス高速スピンエコー法をベースとしているため，臨床撮像との親和性が高く，合成画像の作成にも使用され，**QPM**法としては最も広く使われている (1).

ところが，実装には多くの自由度があり，**メーカー間の互換性**の問題などが指摘されている (2).

(1) Warntjes JB, Leinhard OD, West J, et al. Magn Reson Med. 2008;**60**: 320–329.

(2) Hagiwara A, Hori M, Cohen-Adad J, et al. Invest Radiology 2019;**54**: 47–39.

# メーカー間での互換性の問題



**GE**  $y = 1.056x - 55.59$   
**Siemens**  $y = 1.042x - 32.44$   
**Philips**  $y = 0.9411x - 15.02$

$y = \underline{0.6929}x + 27.27$   
 $y = \underline{0.9166}x + 6.073$   
 $y = \underline{0.7164}x + 15.54$

$y = 1.077x - 1.298$   
 $y = 1.014x - 0.0616$   
 $y = 1.126x - 2.611$

\*Hagiwara A, Hori M, Cohen-Adad J, et al. Invest Radiology 2019;54: 47–39.

# QRAPMASTERの実装条件(公表分)

| Vender    | TR (ms) | TE1 (ms) | TE2 (ms) | Matrix    | FOV (mm)  | ETL | BW (Hz) | SLT (mm) | Gap (mm) | Slice No |
|-----------|---------|----------|----------|-----------|-----------|-----|---------|----------|----------|----------|
| *GE       | 4000    | 16.9     | 84.5     | 320 × 320 | 240 × 192 | 10  | 122     | 5        | 3.8      | 20       |
| *Siemens  | 4250    | 22       | 99       | 320 × 320 | 230 × 185 | 10  | 150     | 5        | 3.8      | 20       |
| *Philips  | 3000    | 13       | 100      | 336 × 336 | 230 × 190 | 10  | 216     | 5        | 3.8      | 20       |
| Simulator | 4800    | 12       | 96       | 256 × 256 | 220 × 220 | 14  | 391     | 5        |          | 24       |

\*Hagiwara A, Hori M, Cohen-Adad J, et al. Invest Radiology 2019;54: 47–39.

RFパルス？

# QRAPMASTERにおける定量化法と問題点

---

## Signal equation:

$$I = A \cdot PD \cdot \underline{\exp(-TE/T_2)} \frac{1 - \{1 - \cos(B_1\theta)\} \exp(-TI/T_1) - \cos(B_1\theta) \exp(-TR/T_1)}{1 - \cos(B_1\alpha) \cos(B_1\theta) \exp(-TR/T_1)}$$

$\alpha$ : flip angle of the saturation pulse (120°)

$\theta$ : flip angle of the excitation pulse (90°)

$B_1$ : inhomogeneity factor for excitation pulse (ideally 1.0)

解析には, SyntheticMR社のソフトが使われている

## Problems:

- ✓ **Flip angle distribution** along the slice direction is **not** considered
- ✓ **T2 decay** is **not** correctly described because the **FSE** is used



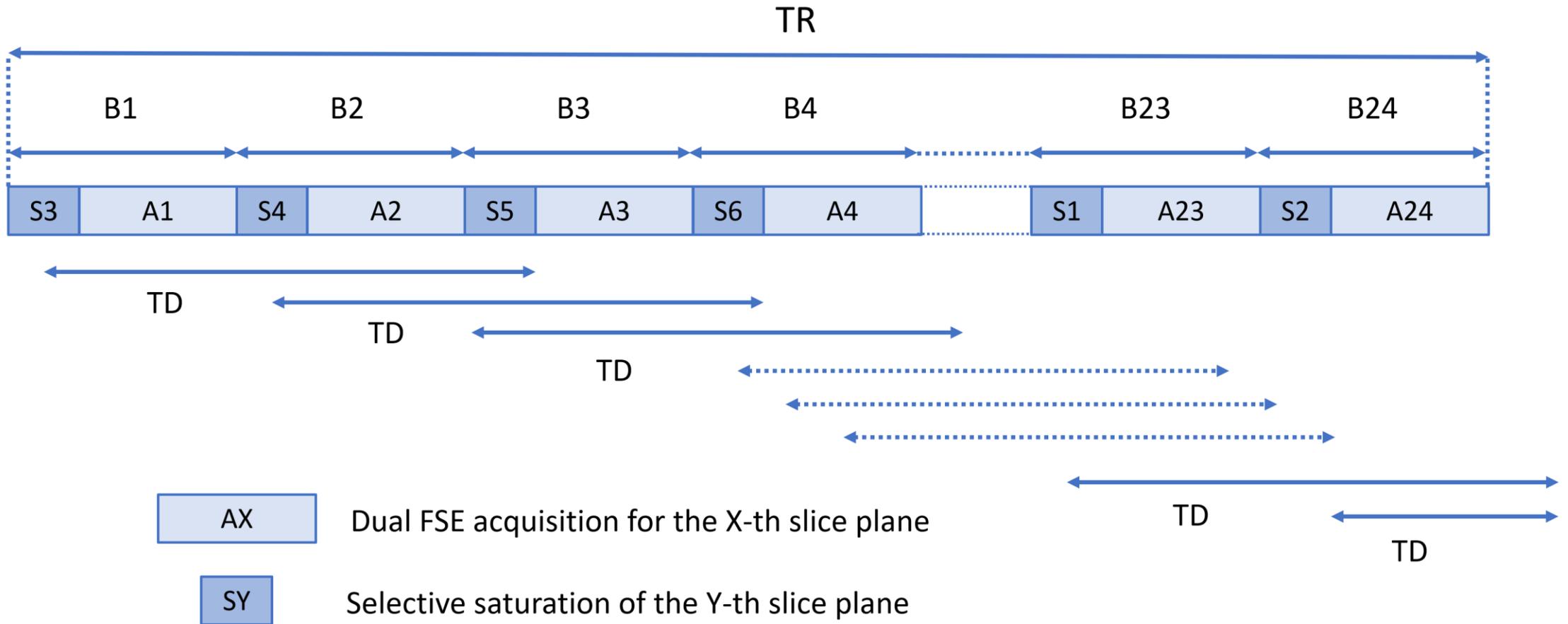
**Solution:** dictionary matching using the **Bloch simulation**

# 本研究の目的

---

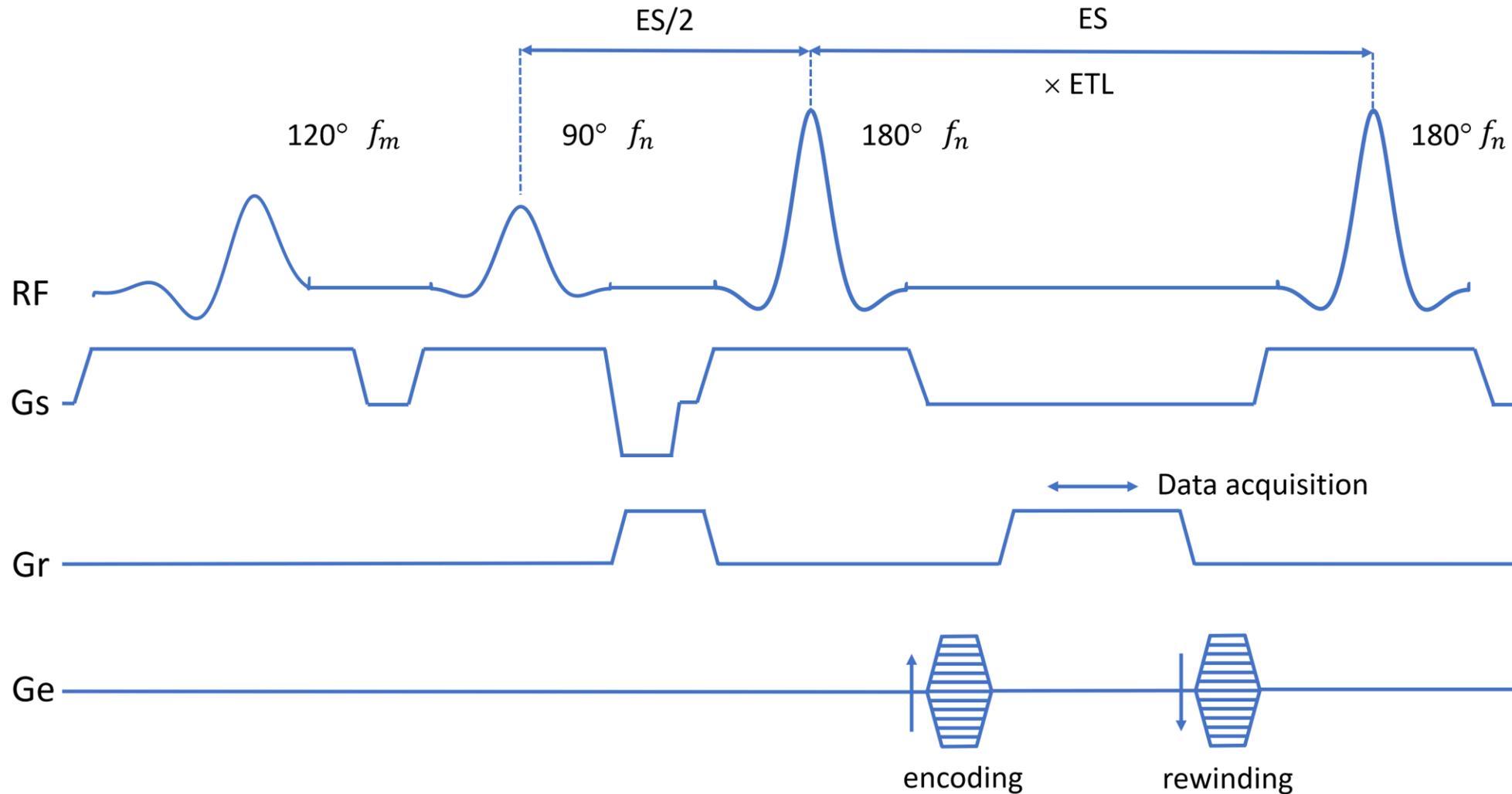
1. QRAPMASTER法のシーケンスをMRIシミュレータに実装し、数値ファントムを用いたシミュレーション手法を開発する。
2. 緩和時間標準ファントムを用いて作成した辞書とのマッチング手法を開発し、定量化手法としての妥当性を評価する。
3. 実装方法の検証におけるシミュレータの有用性を示す。

# QRAPMASTER法の原理



Dual contrast **multi-slice FSE** with interleaved saturation pulse

# 実装したパルスシーケンス (PSDKで記述)



**TR = 4800 ms, TE1 = 12 ms, TE2 = 96 ms, ES = 12 ms, ETL = 14 (7+7)**

# パルスシーケンスのループ構造

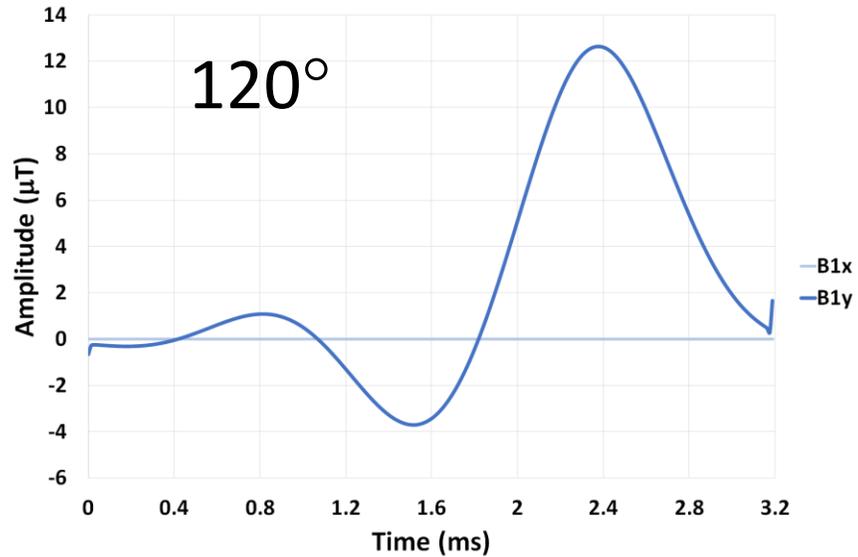
```
73 ... with Main():
74 ...     with Loop("PE1", NPE1 + 1):
75 ...         with Loop("SL", 24):
76 ...             BlockRef("Saturation")
77 ...             BlockRef("Excitation")
78 ...             BlockRef("Slice_refocus+Prephasing")
79 ...             WaitUntil(TE * 0.5 + 20.0e+3)
80 ...             with Loop("Echo", NEcho1):
81 ...                 BlockRef("Refocus")
82 ...                 BlockRef('Phase_encoding+Acquisition_1')
83 ...                 WaitUntil(TE * 1.0)
84 ...             with Loop("Echo", NEcho2):
85 ...                 BlockRef("Refocus")
86 ...                 BlockRef('Phase_encoding+Acquisition_2')
87 ...                 WaitUntil(TE * 1.0)
88 ...             WaitUntil(200.0e+3)
89 ...         WaitUntil(TR)
```

phase encoding loop  
slice selection loop  
saturation pulse (120°)  
excitation pulse (90°)

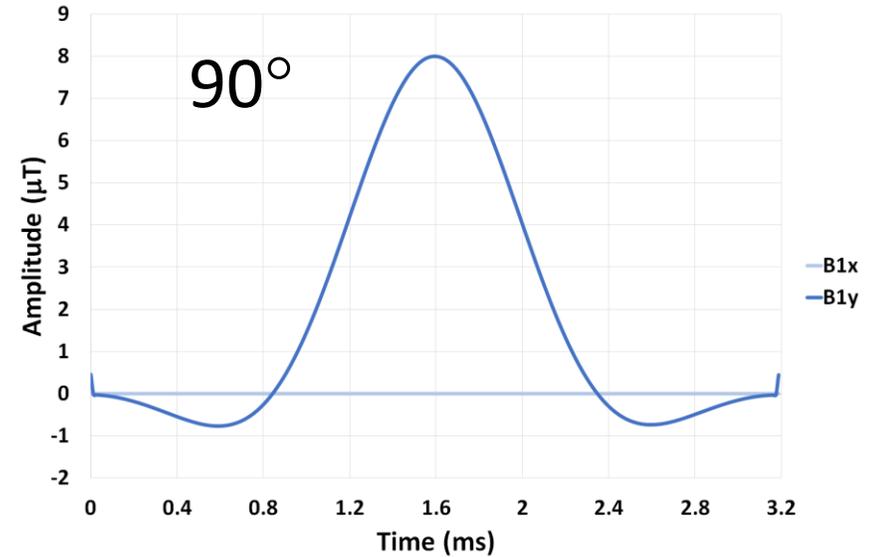
1st multi-echo loop

2nd multi-echo loop

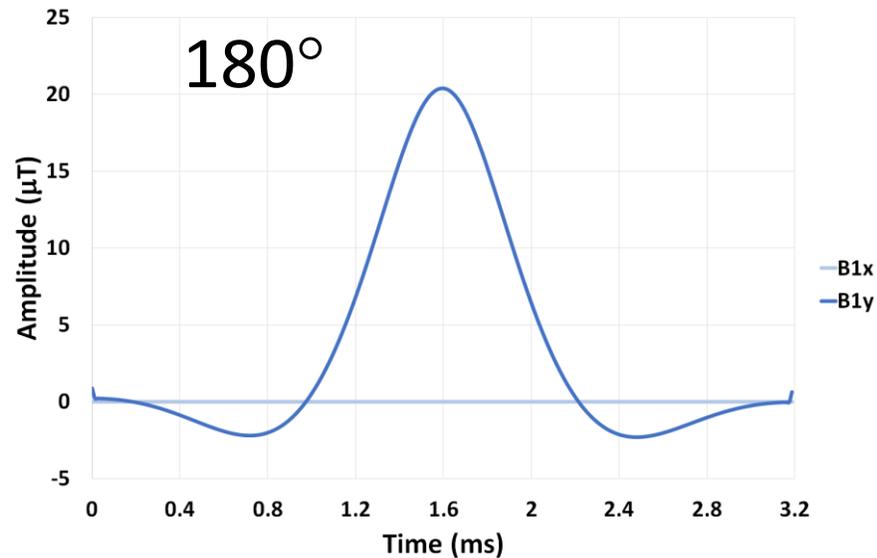
# RFパルス：SLRパルス



**saturation pulse**

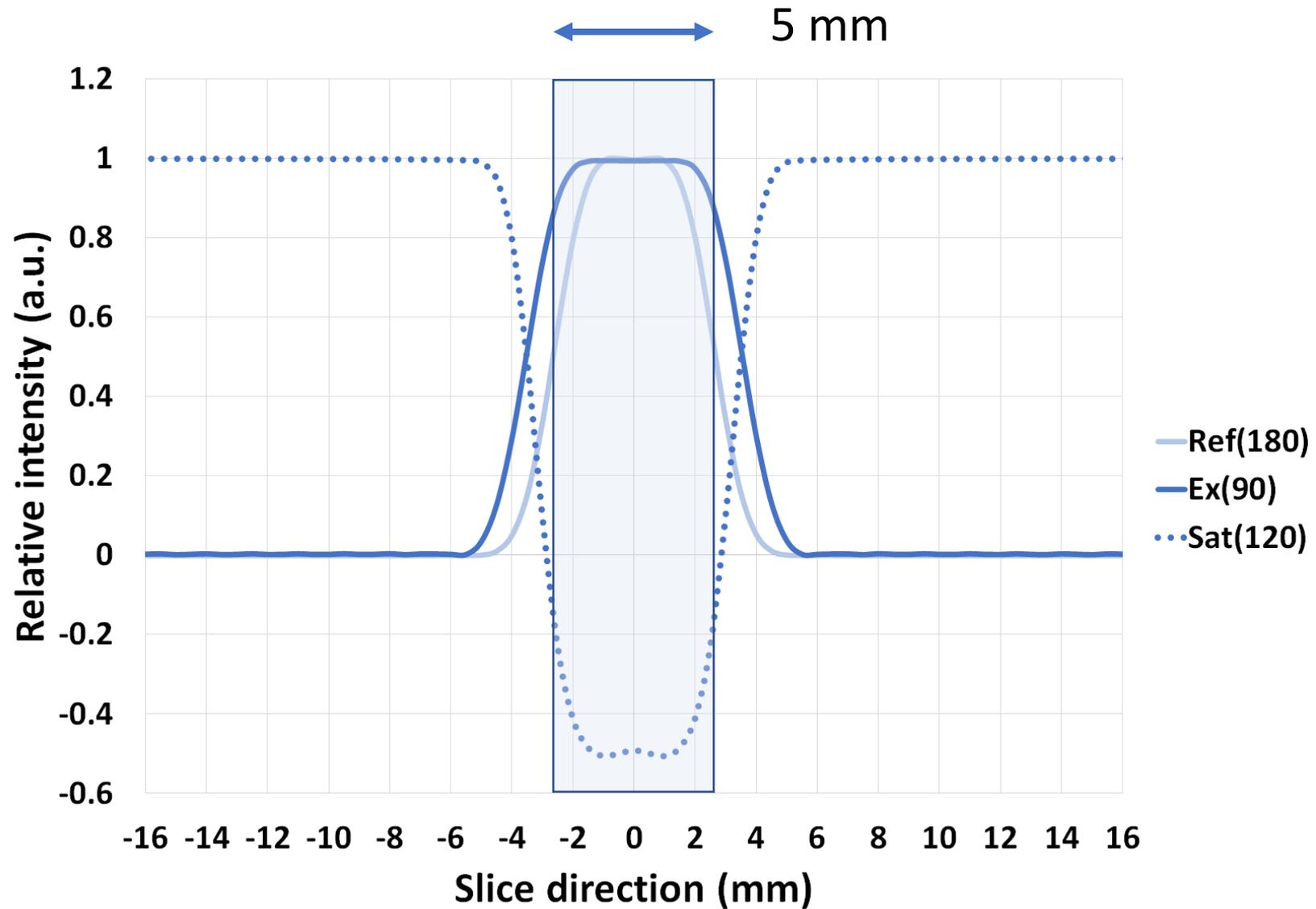


**excitation pulse**

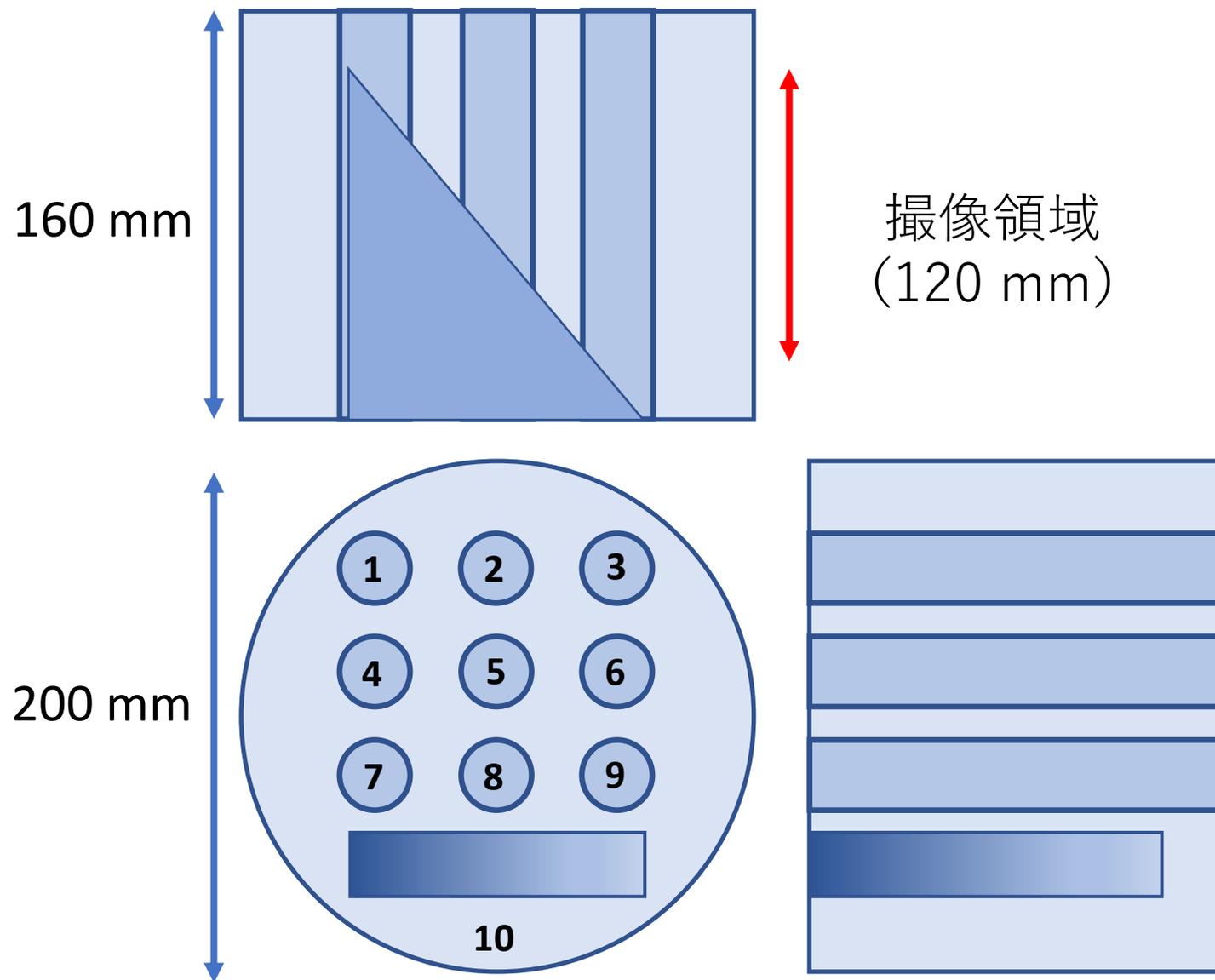


**refocus pulse**

# RFパルスの選択性

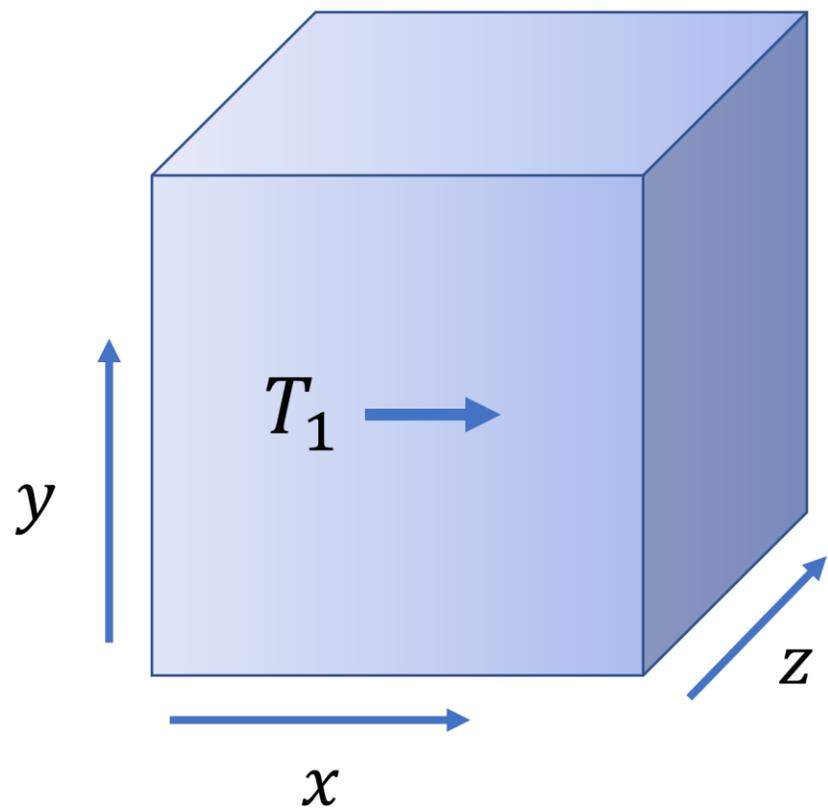


# 数値ファントム：スライス・緩和時間評価

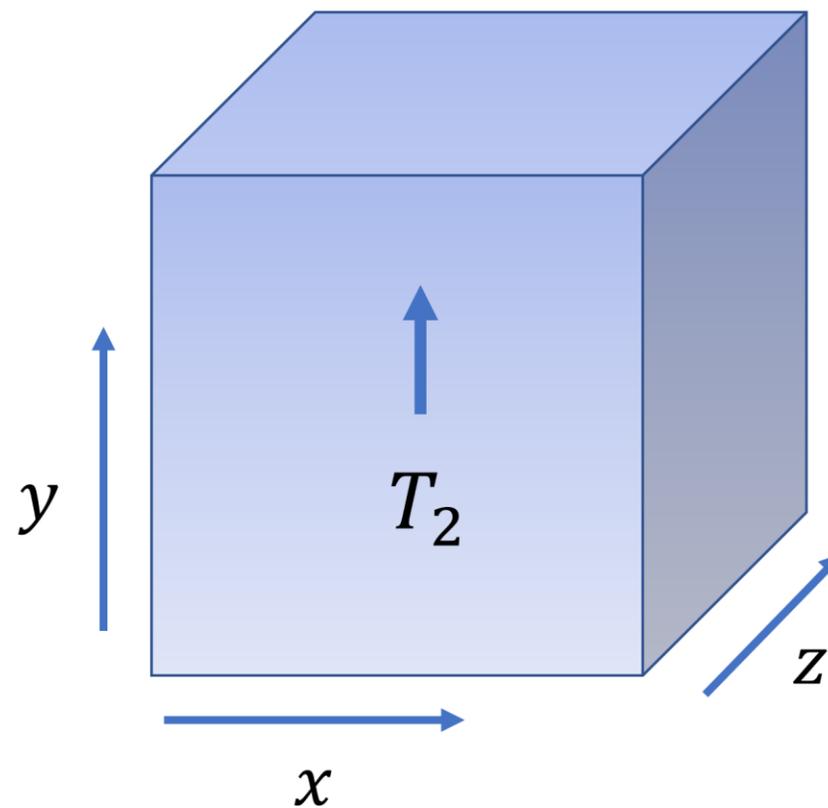


| Pos. | Organ      | T1 (ms) | T2 (ms) |
|------|------------|---------|---------|
| 1    | GM         | 1000    | 80      |
| 2    | WM         | 600     | 80      |
| 3    | Adipose    | 256     | 84      |
| 4    | Lung       | 829     | 79      |
| 5    | Liver      | 568     | 56      |
| 6    | Hemangioma | 1337    | 176     |
| 7    | Spleen     | 782     | 62      |
| 8    | Kidney     | 559     | 84      |
| 9    | Edema      | 1488    | 67      |
| 10   | Muscle     | 868     | 47      |

# 数値ファントム：緩和時間定量化



(a)  $T_1$  map

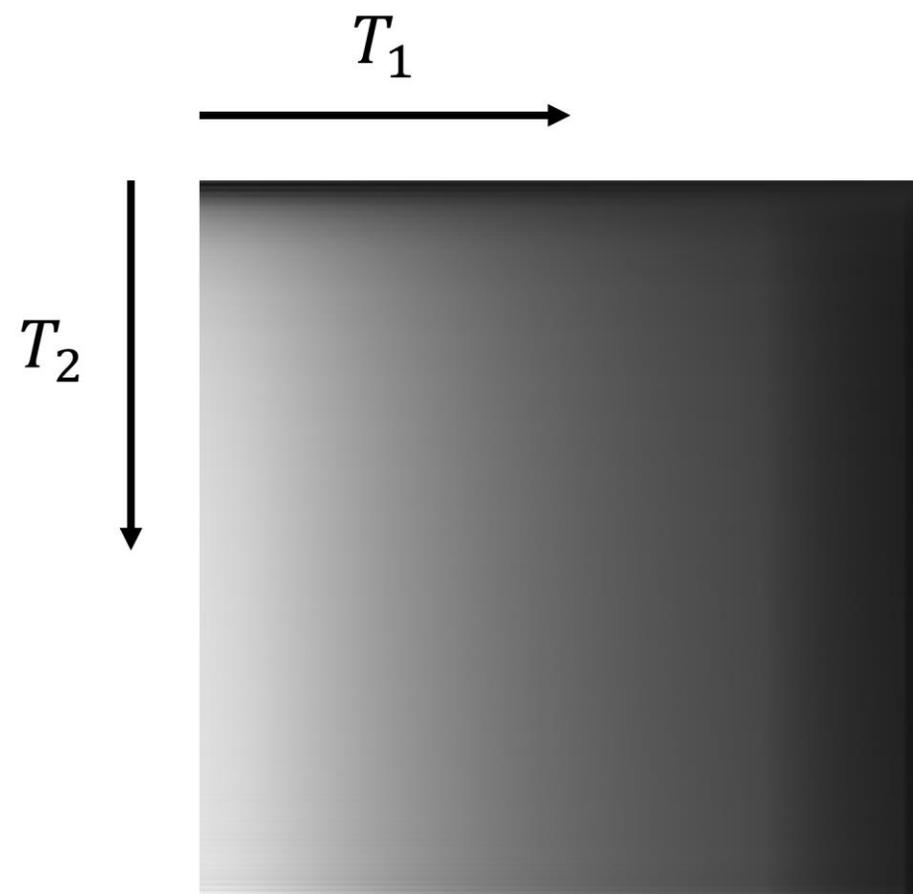


(b)  $T_2$  map

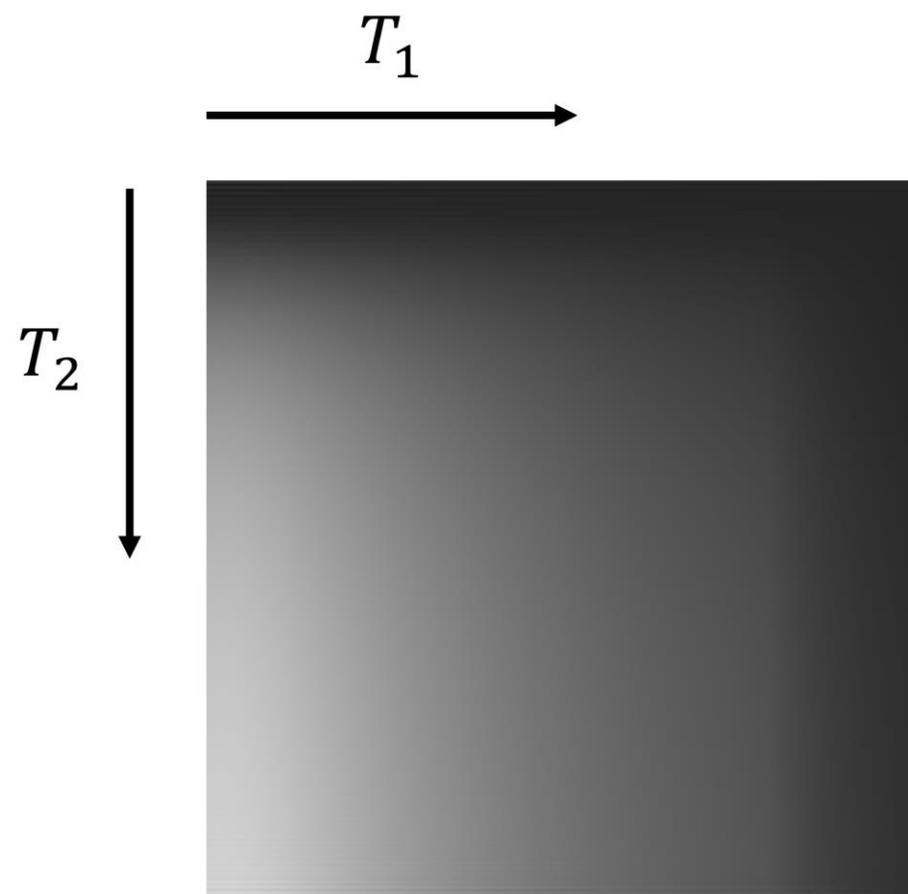
$256^3$  voxel

# 数値フantom：緩和時間定量化

---



(a) 1st echo image for TD = 620 ms



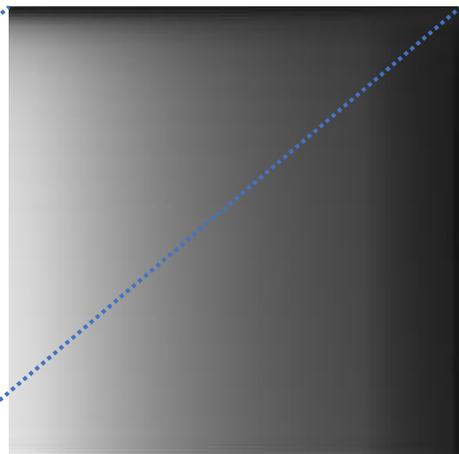
(b) 2nd echo image for TD = 620 ms

# 定量化の方法：辞書データとのマッチング

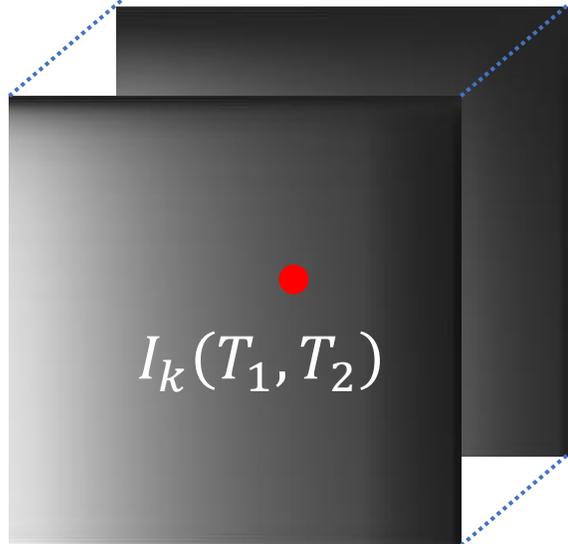
TE × 2, TD × 4  
real, imaginary

16 images

16



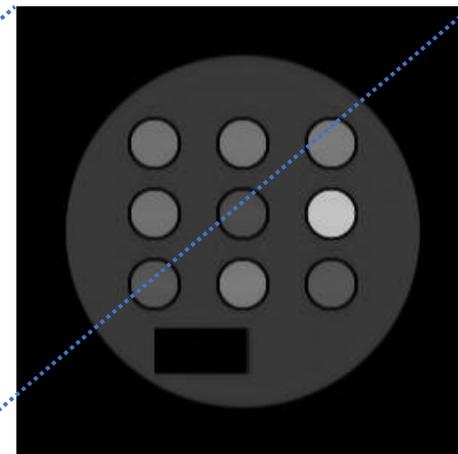
2



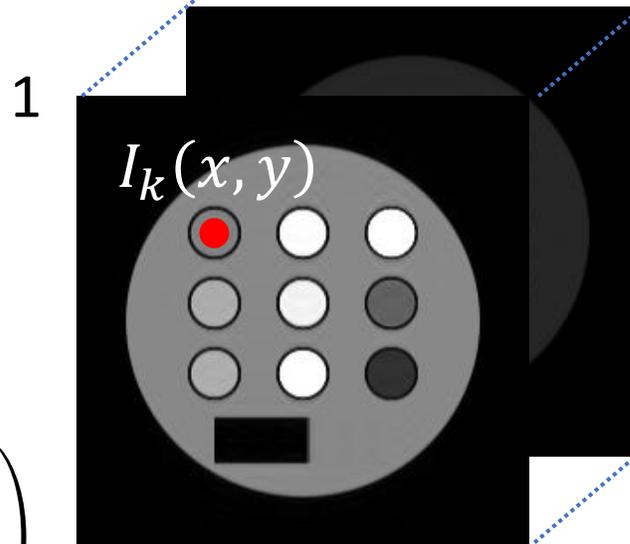
TE × 2, TD × 4  
real, imaginary

16 images

16



2



$$\min \left( \sum_{k=1}^{16} (I_k(T_1, T_2) - I_k(x, y))^2 \right)$$

誤差最小化  
= 内積最大化

# シーケンスパラメータとシミュレーションの条件

---

## Sequence parameters:

TR = 4800 ms, TE1 = 12 ms, TE2 = 96 ms

Echo spacing = 12 ms, ETL = 14 (7 + 7)

Slice thickness = 5 mm, Number of slices = 24

FOV = 220 mm × 220 mm, Image matrix = 256 × 256

Delay time = 620 ms, 1220 ms, 2420 ms, 3620 ms

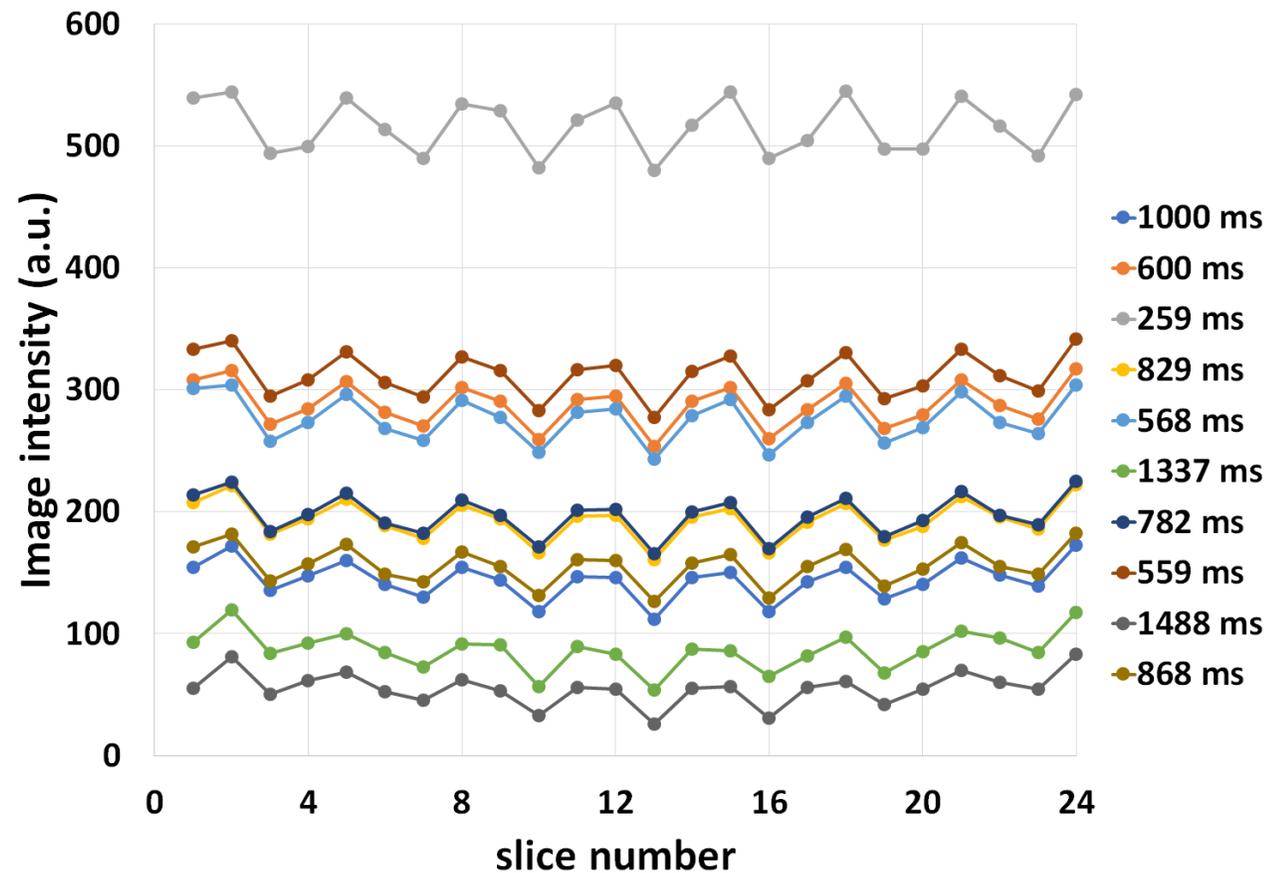
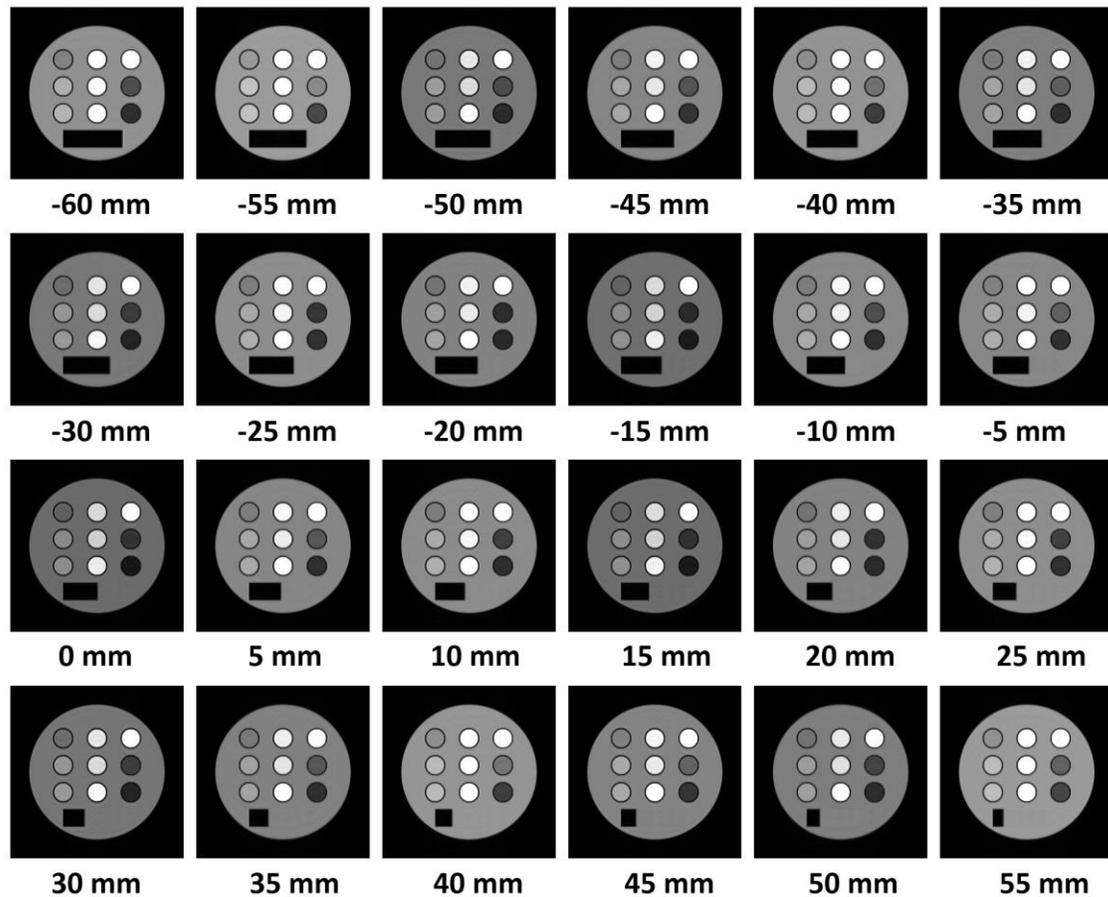
Image acquisition time =  $4.8 \times 33 \times 4 = 633.6$  s (reduced by PI)

Number of subvoxels =  $1 \times 1 \times 32$

PC : CPU (core i7 5960X), 96 GB memory

GPU : GeForce **RTX 2080Ti** (4352 cuda core, 11 GB memory)

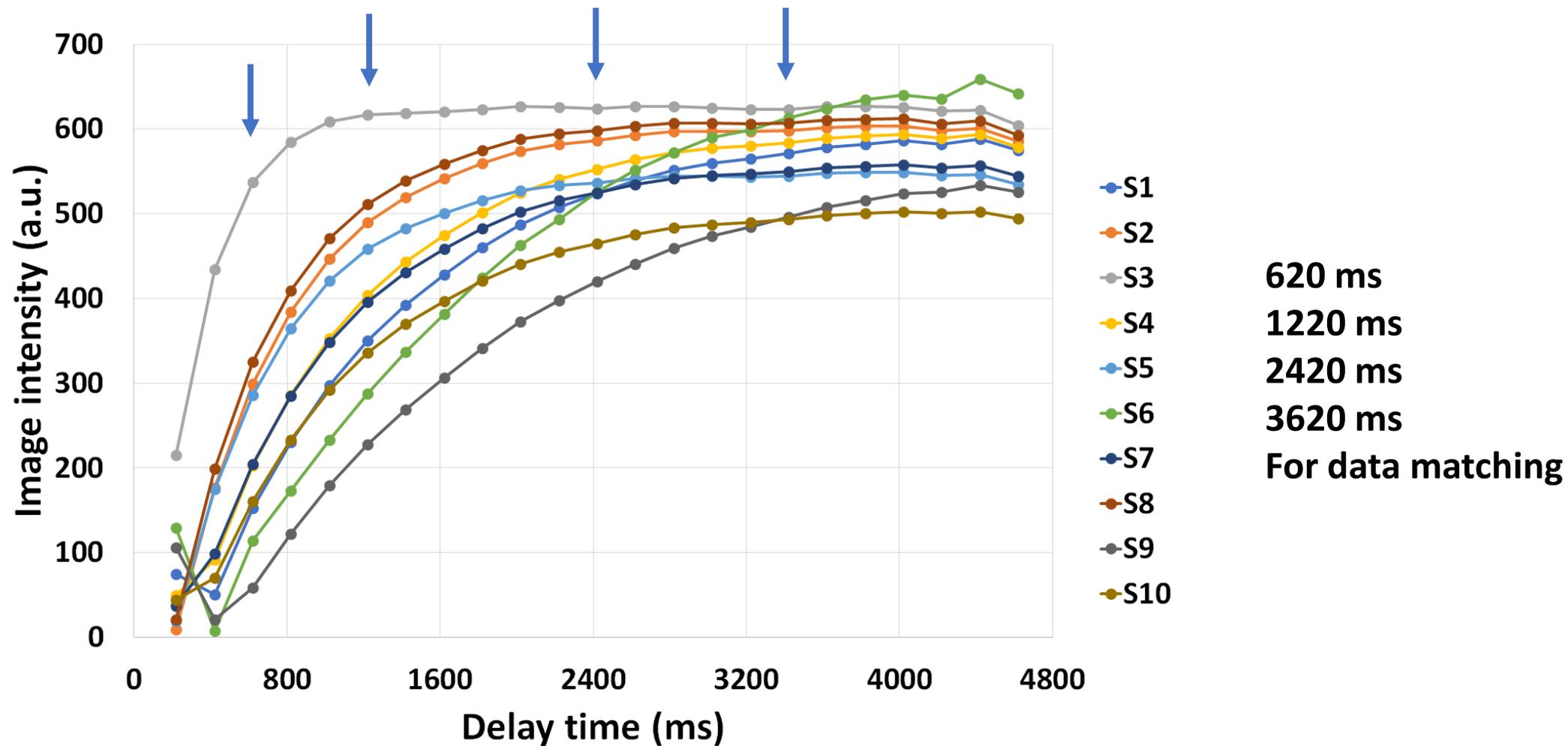
# QRAPMASTERのシミュレーション結果 (1)



TD = 620 ms, TE = 12 ms, calculation time = 130 min.

スライス間の干渉による画素強度の変動がみられる

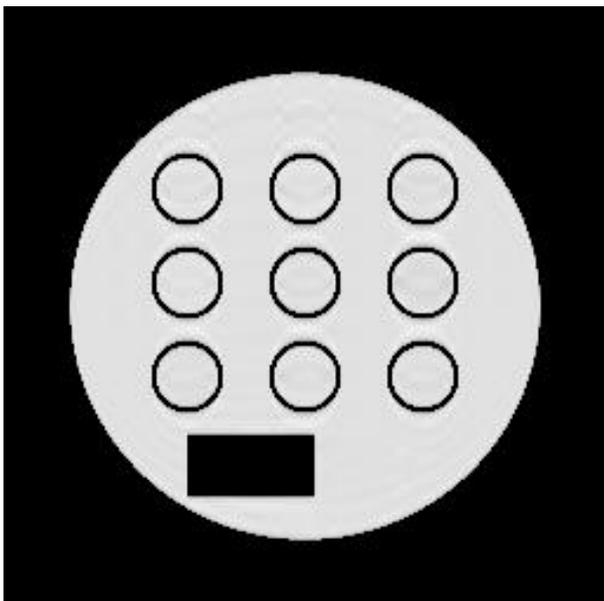
# QRAPMASTERのシミュレーション結果 (2)



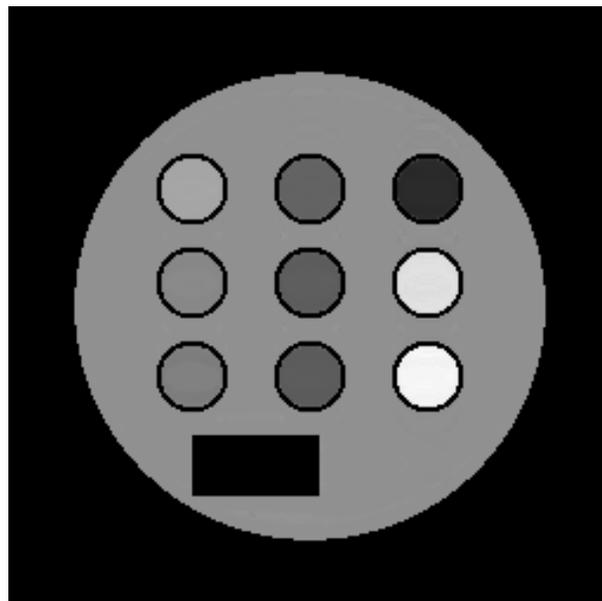
TDに対する画素強度の変化 (TE = 12 ms)

# パターンマッチングの結果：中央断面

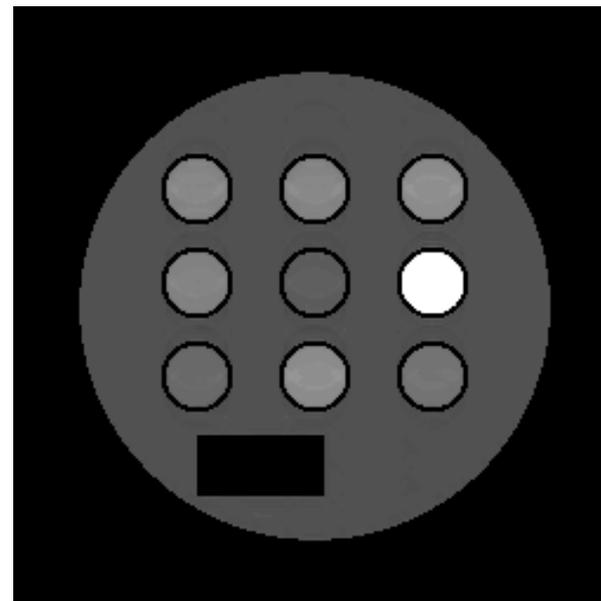
---



Matched PD



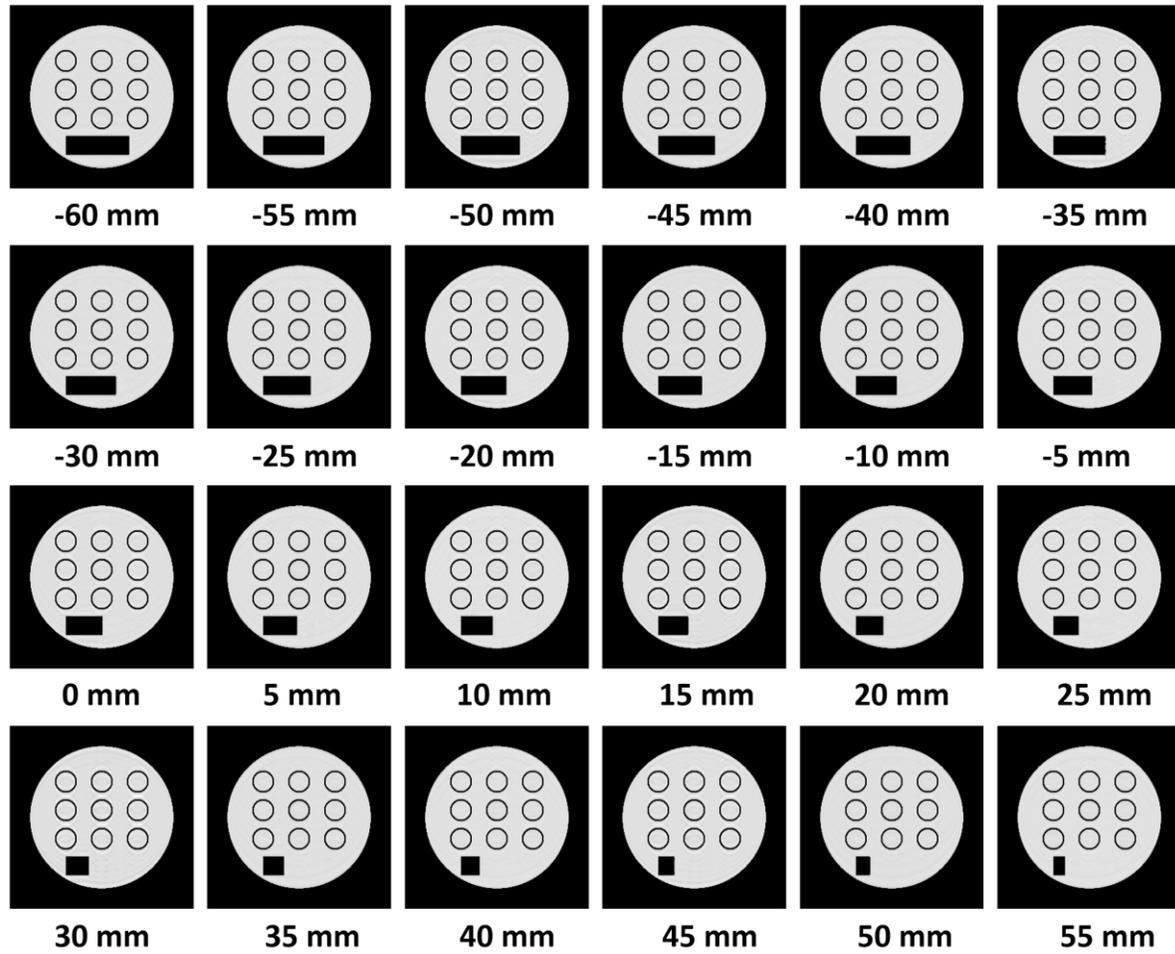
Matched  $T_1$



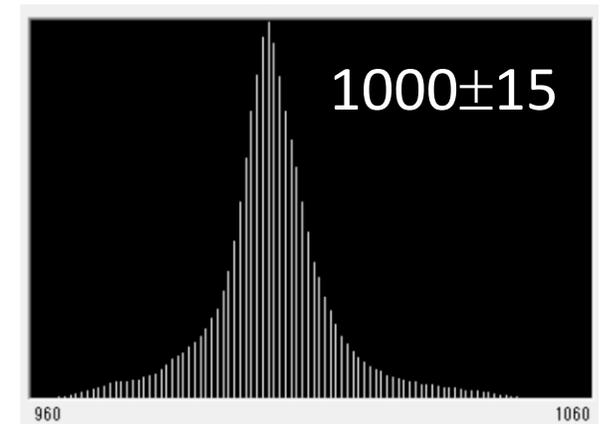
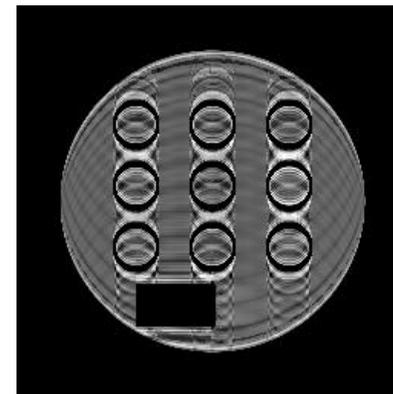
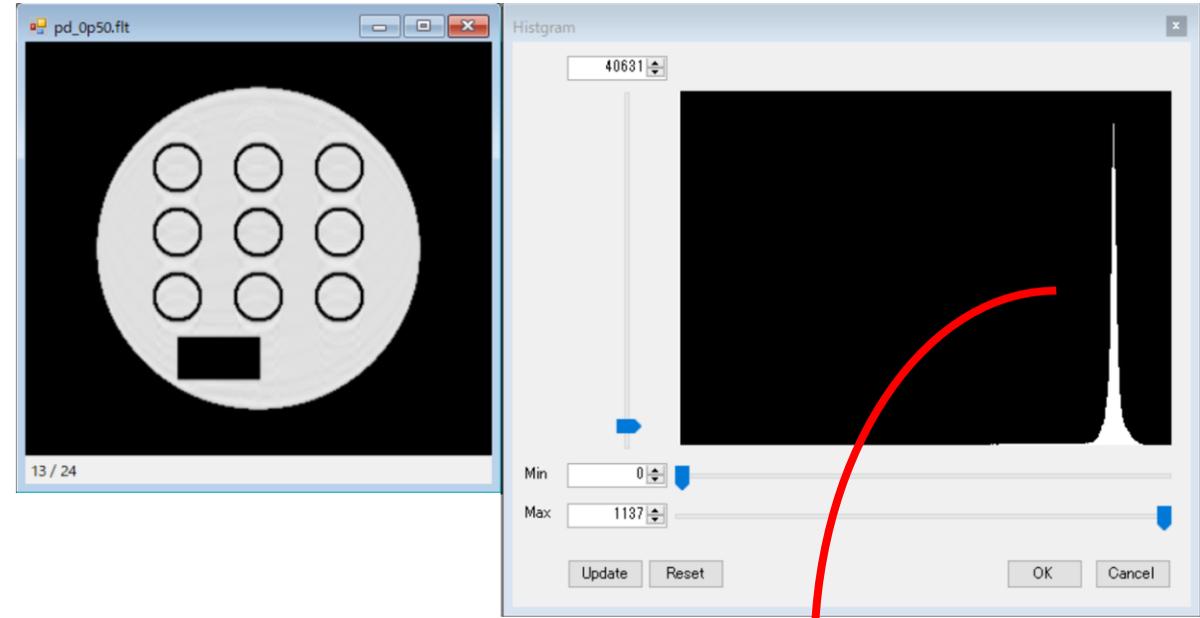
Matched  $T_2$

マッチングされた $T_1$ ,  $T_2$ におけるPDW画像の絶対値画像の画素強度比より算出

# マッチングにより求められたPD分布

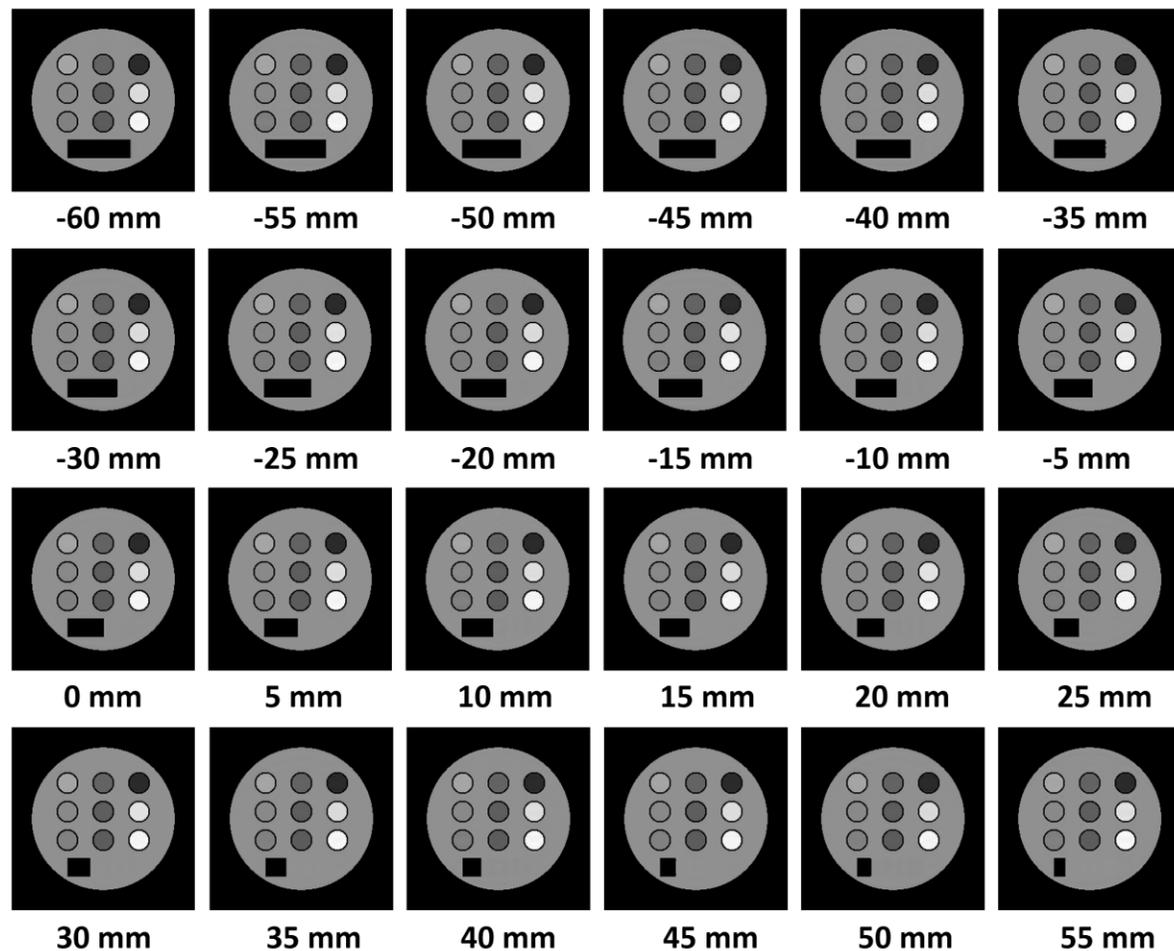


PD mapping by dictionary matching

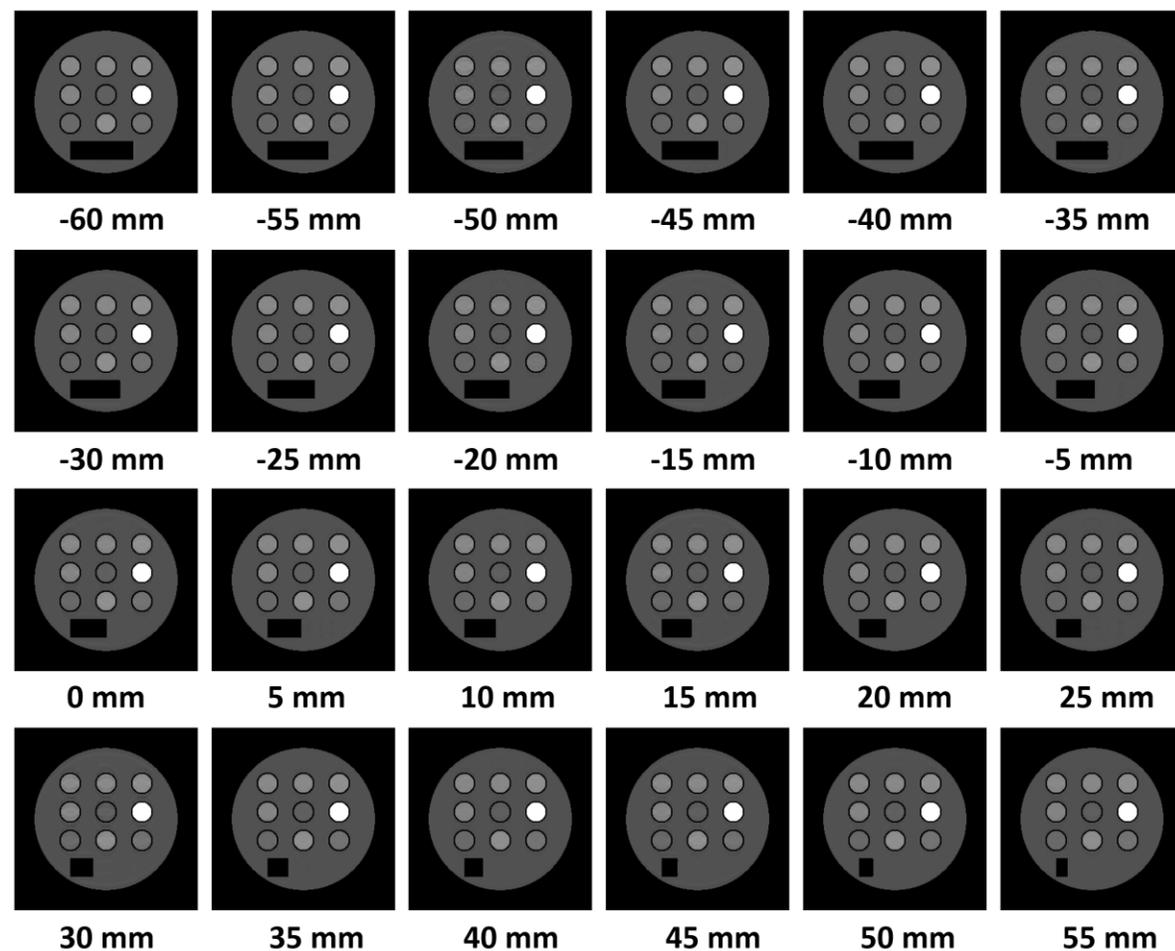


Extended window image  $\pm 1.5\%$  distribution

# マッチングにより求められたT1分布とT2分布

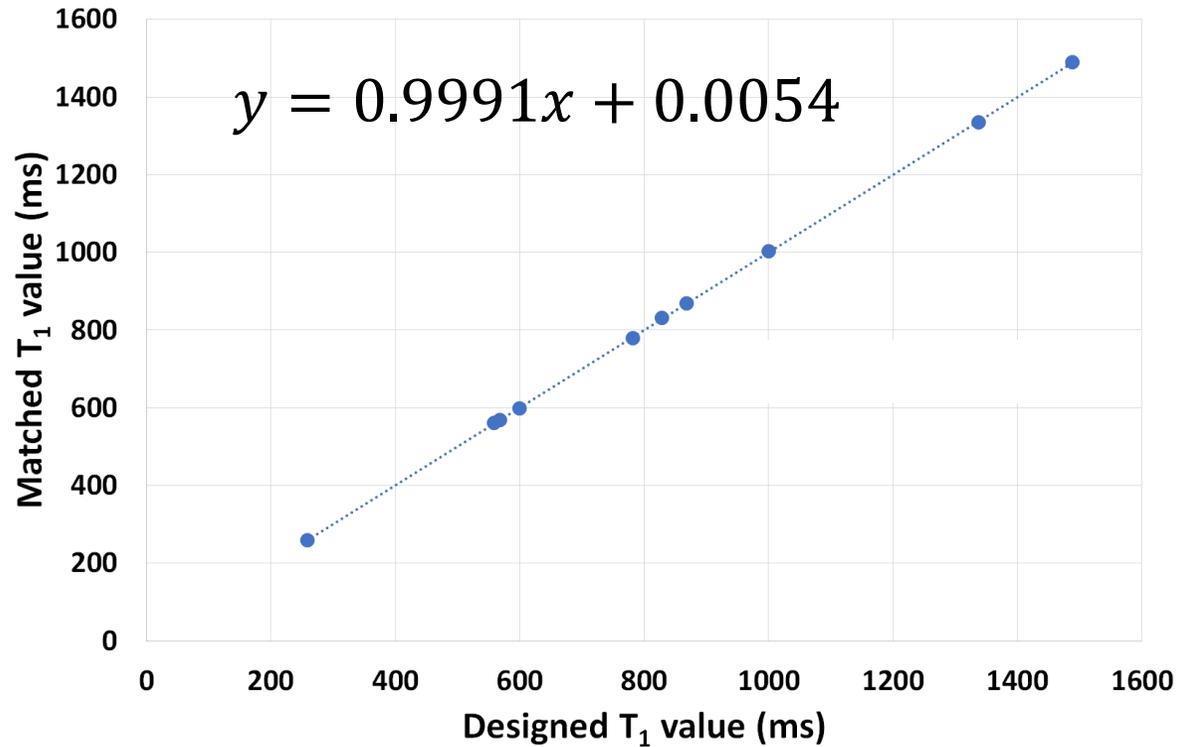


T1 mapping by dictionary matching

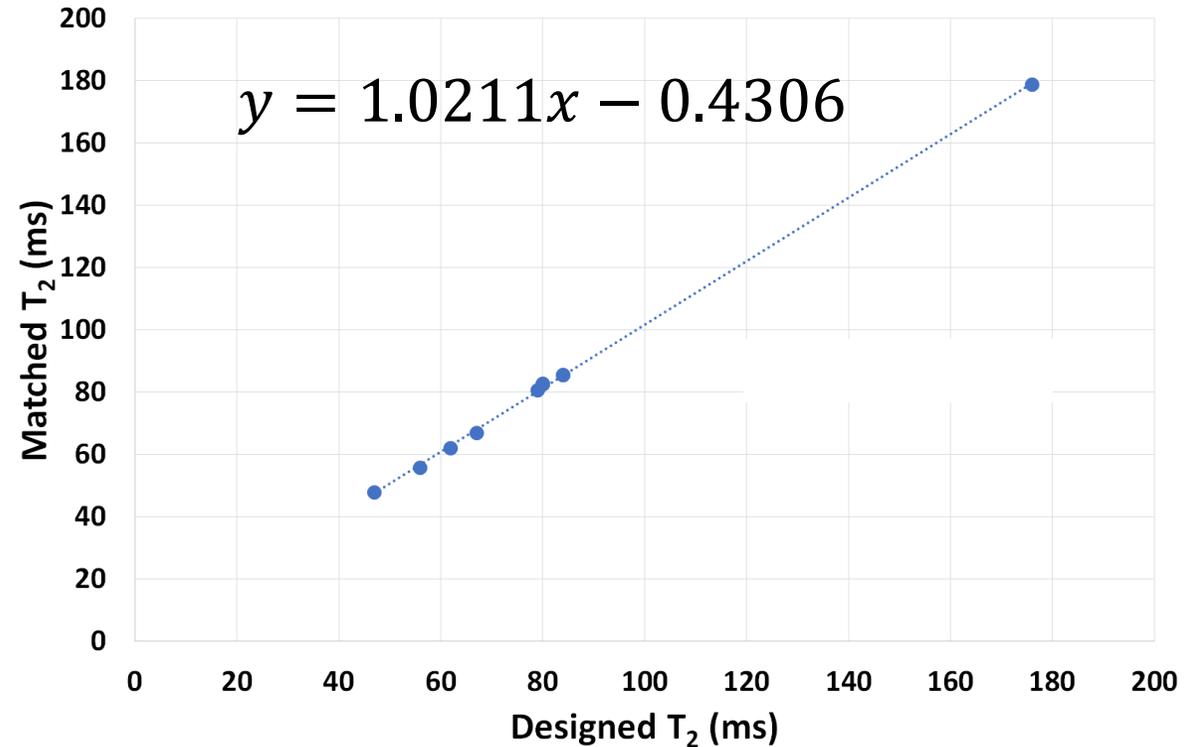


T2 mapping by dictionary matching

# 緩和時間の計測精度

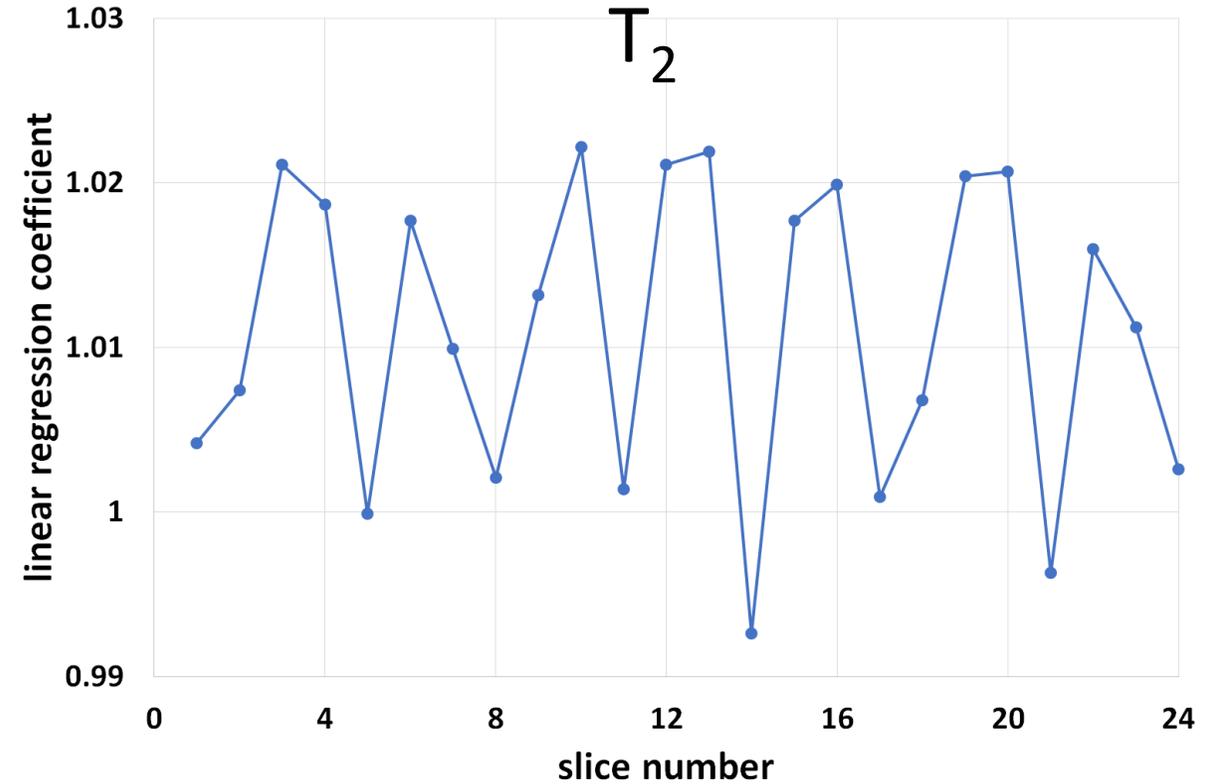
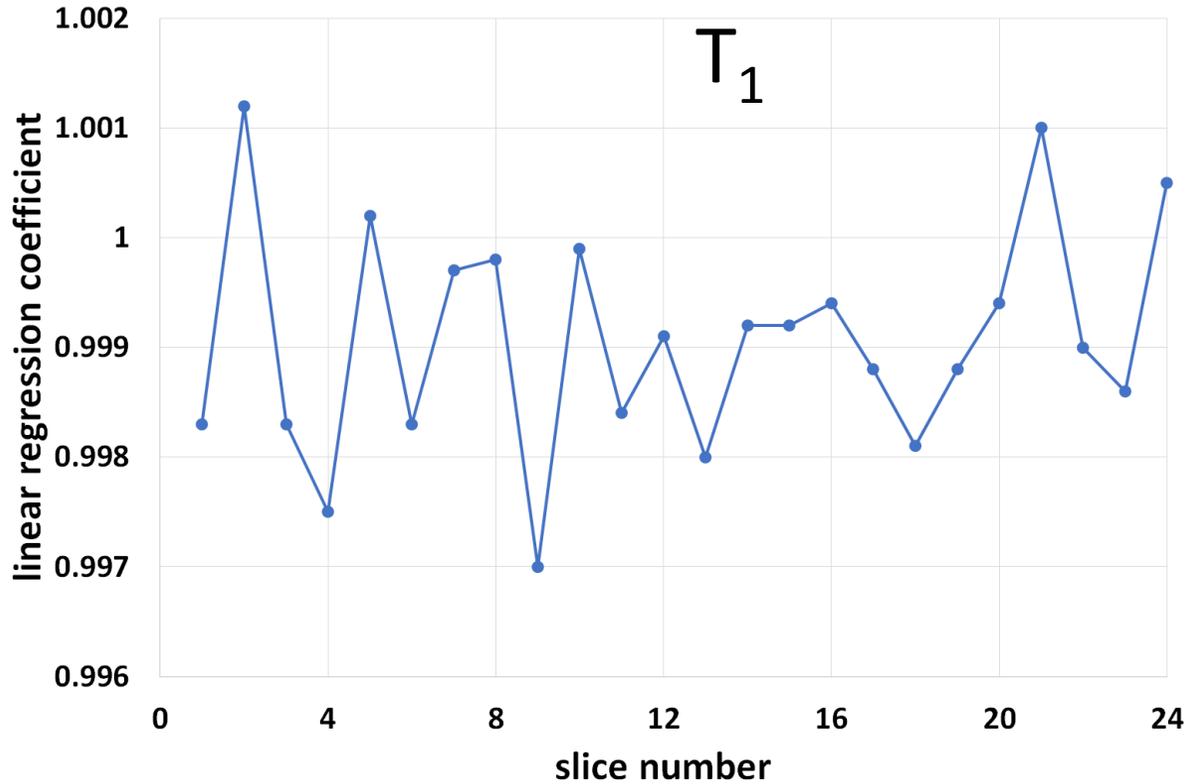


Designed T<sub>1</sub> vs Measured T<sub>1</sub> for the central slice



Designed T<sub>2</sub> vs Measured T<sub>2</sub> for the central slice

# 全スライスにおける直線回帰係数



Linear regression coefficient : **0.9991±0.0010**

Linear regression coefficient : **1.0111±0.0093**

👉 すべてのスライス面ではほぼ正確な緩和時間計測が行われている

# 検討

---

シミュレーションにおいて、辞書データとのマッチングを行うことにより、撮像領域のすべてのスライスにおいて、ほぼ正確なPD,  $T_1$ ,  $T_2$ の計測が可能であった。

すなわち、FSEにおける信号強度を正確に評価すれば、2種類のTEと4種類のTDからでも、 $T_1$ と $T_2$ の正確な評価は可能であった。

よって、実機において、正しい $T_2$ の評価が得られていないのは、恐らく、FSEによる信号の評価が正しくないことによると思われる。

# 結論

---

1. QRAPMASTER法のシーケンスを，MRIシミュレータに実装した．実装のポイントは，面内のサブボクセル数を最小化（ $1 \times 1$ ）し，スライス方向に関しては，正しい画素強度を実現するための最小のサブボクセル数（32）の確保が必須であった．
2. 辞書ファントムのシミュレーション結果を用いて，撮像対象とするファントムのシミュレーション結果とのマッチングを行うことにより，正確なNMRパラメタの算出が可能であることを示した．
3. MRIシミュレータは，QRAPMASTER法の実機への実装手法の評価を行う上で，有用なツールである．