

企画 1

今からでも大丈夫！！

MRI入門Part4 パラレルイメージング

GRAPPA

GRAPPA

法の基礎と特徴について



公立大学法人 横浜市立大学附属 市民総合医療センター 放射線部

出川 輝浩

Agenda

Parallel Imaging ?

GRAPPAの原理

GRAPPAの特徴

当センターの紹介

場所 : 横浜市南区浦舟町4丁目57番地

最寄駅 : 阪東橋 (横浜市営地下鉄)

ベッド数 : 726床 (本館679床、救急棟47床)

外来数 : 1,926人/日

●放射線部

- 画像診断医 7名
- 診療放射線技師 50名

●MRスタッフ

- 4人
- 2台×22件
- 20分枠

**MAGNETOM
Avanto1.5T VB19
(SIEMENS)**

●専門診療科

総合診療科

血液内科

腎臓内科

婦人科

内分泌・糖尿病内科

耳鼻咽喉科

乳腺・甲状腺外科

整形外科

歯科口腔外科矯正歯科

皮膚科

泌尿器・腎移植科

放射線科

眼科

麻酔科

神経内科

形成外科

リハビリテーション科

脳神経外科

病理診断科

●疾患別センター

高度救命救急

総合周産期母子医療

リウマチ膠原病

呼吸器病

精神医療

心臓血管

消化器病

小児総合医療

炎症性腸疾患(IBD)

生殖医療

What is the Parallel Imaging?

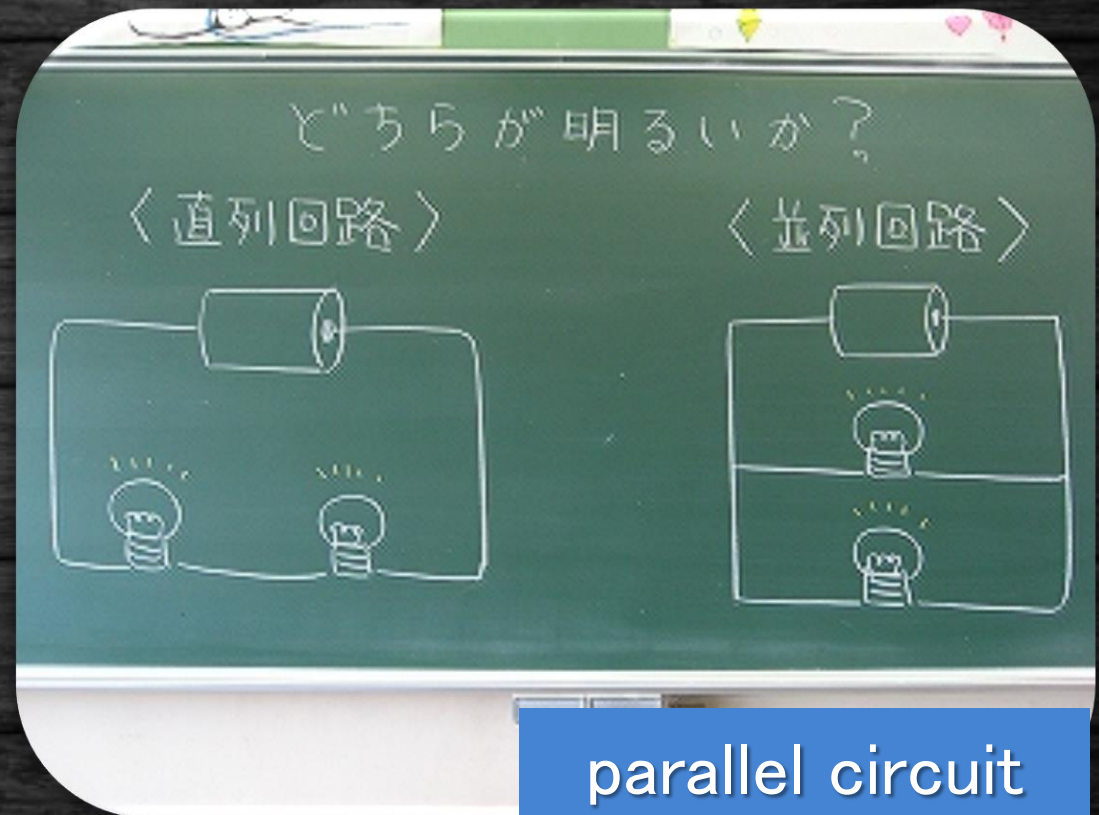
Parallel: 平行、並列



parallel ski



parallel bar



parallel circuit

同時に複数の処理をする事

Parallel Imaging

複数のコイルを組み合わせて撮像し、
画像再構成時に特殊なアルゴリズムを使用して
撮像時間を短縮させる技術の総称

k-space based algorithmのイメージ図

k-spaceを
間引いて収集

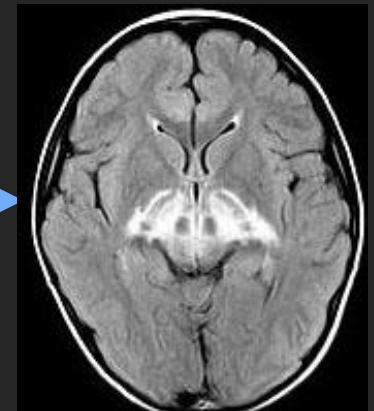


コイル感度
分布確認

補正された
ローデータ

SMASH
再構成

FFT



PIの目的は？

高速化（＝時間短縮）

1998年～

**Bird Cage
Coil**



**TA
5:50**

2012年～

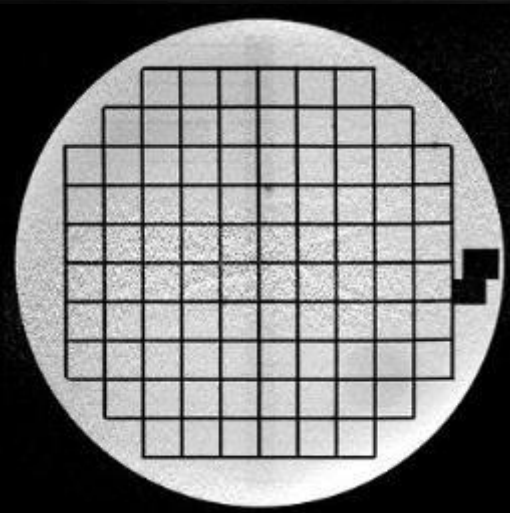
**16ch
Multi Coil**



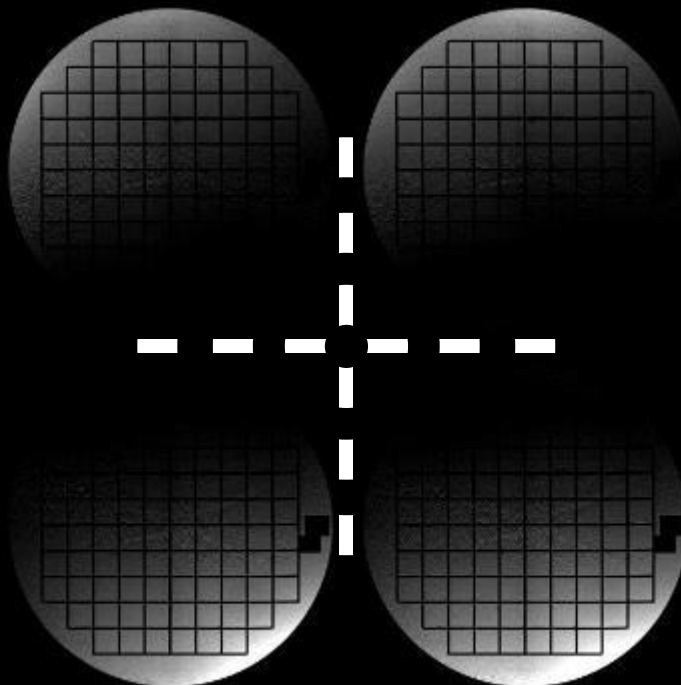
**TA
2:40
With SENSE**

PIに必要な道具

Single channel



Multi channel



撮像時間を考える (2D-imaging)

○ Spin Echo法

: TR × N_{phase} × Average数

○ Turbo Spin Echo法

: TR × N_{phase} × Average数 / Turbo Factor

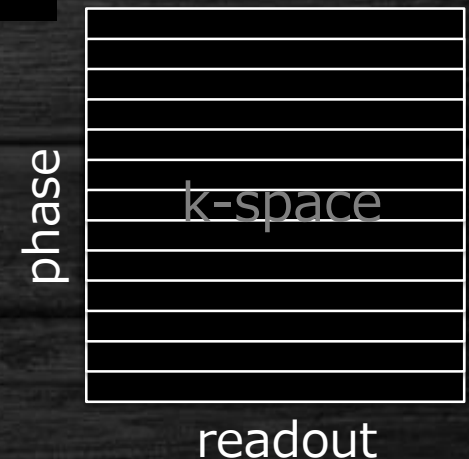
○ Gradient Echo法

: TR × N_{phase} × Average数

k-spaceの充填時間

= TR (繰り返し時間)

× N_{phase} (位相エンコード数)



For shortening the TA

繰り返し時間を短くする : TR ↓

データ収集量を減らす : N_{phase} ↓

What happens
when I shorten the
TR?

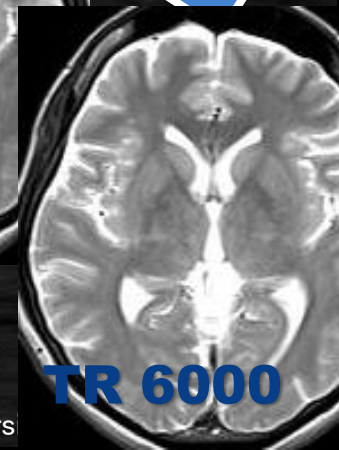
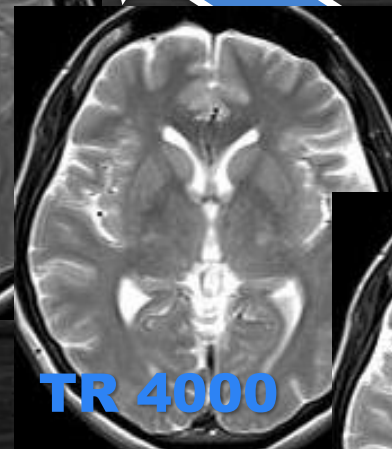
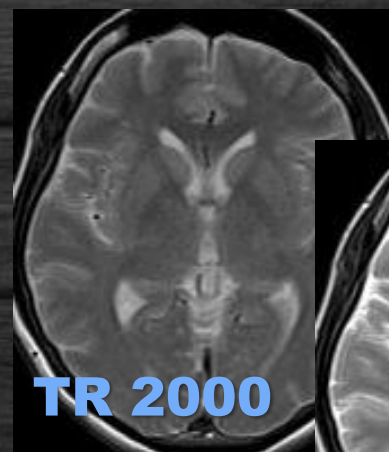
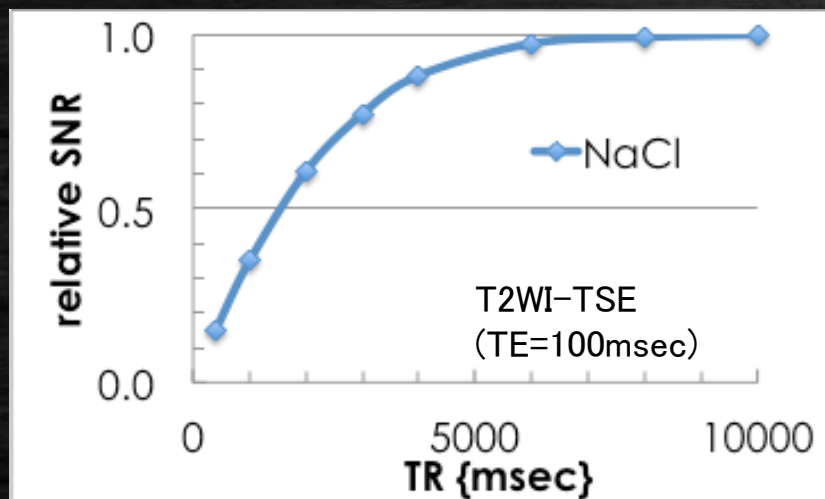
TRを短くする (For shortening the TA)



《 TR短縮による臨床的制限 》

- 組織のT1回復が不十分になり、SNRの低下

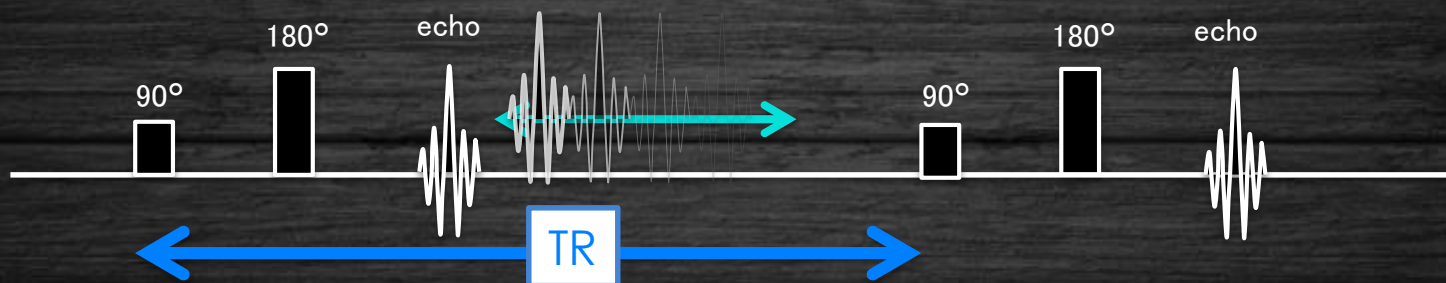
- T2コントラスト低下



TRを短くする (For shortening the TA)

《 TR短縮による臨床的制限 》

- 撮像可能なスライス枚数の減少



- SARの増加

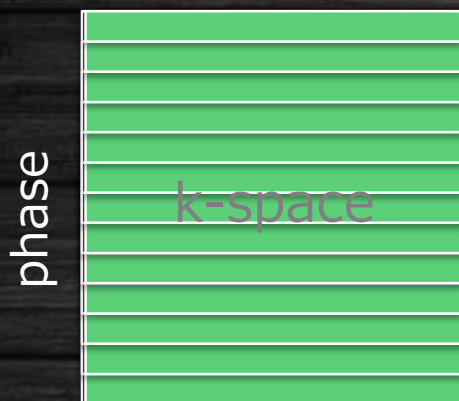
$$SAR \propto \frac{\sigma \times T / TR \times (B_0 \times \theta \times R)^2}{\rho}$$

σ : 電気伝導度
 T : RF照射時間
 B_0 : 磁束密度
 θ : フリップ角
 R : 半径
 ρ : 密度

What happens
when I reduce the

N_{phase} ?

N phaseを減らす (For shortening the TA)



readout

Matrix : 256*256

Pixel size : 1mm²

SNR : 100%

TA : 100sec

位相方向の
データ数を半分に



readout

撮像時間が半分に！

- Rectangular FOV (FOV phase)
- Rectangular Matrix (Phase Resolution)
- Half Fourier (Phase Partial Fourier)

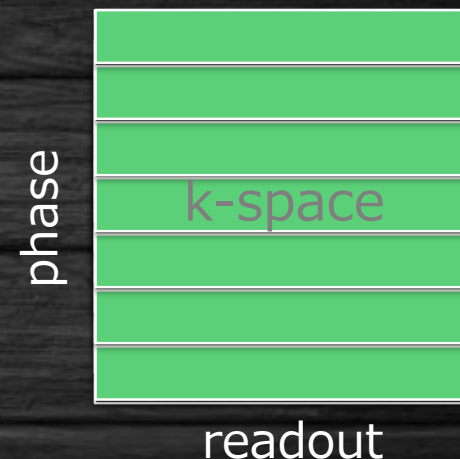
N phaseを減らす (For shortening the TA)

● Rectangular FOV (FOV phase)

データサンプリング間隔を広くして収集

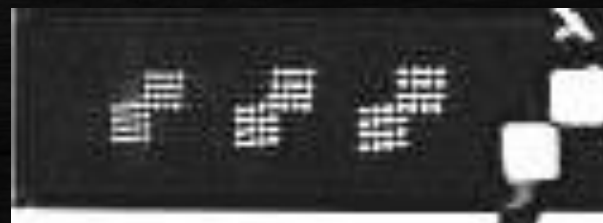
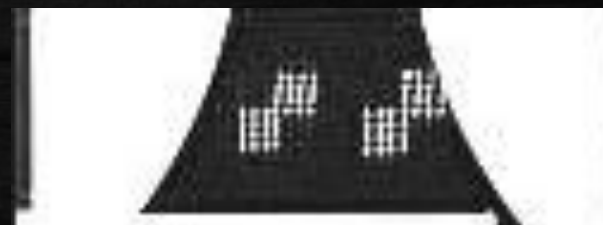
- ・ TAは短縮
- ・ 空間分解能は不変
- ・ SNRは低下

○折り返しアーチファクトに注意



【 Rectangular FOV 50%であれば 】

- ・ TA : 50sec (短縮)
- ・ Matrix size : 256×256
- ・ Pixel size : 1×1mm²
- ・ SNR : 71% (低下)

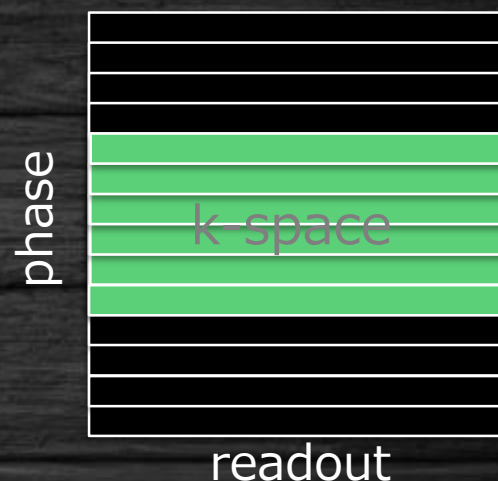


N phaseを減らす (For shortening the TA)

● Rectangular Matrix (Phase Resolution)

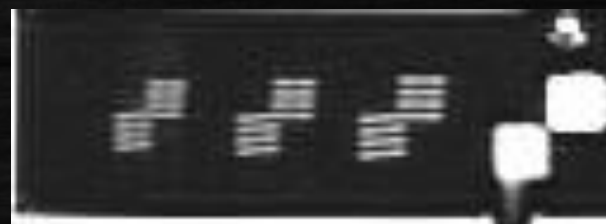
k-spaceの両端を間引く

- ・ TA短縮
- ・ 空間分解能は低下
- ・ SNRは向上



【 Rectangular Matrix 50%(128)であれば 】

- ・ TA : 50sec (短縮)
- ・ Matrix size : 128×256
- ・ Pixel size : 2×1mm² (拡大)
- ・ SNR : 141% (向上)



50%



100%

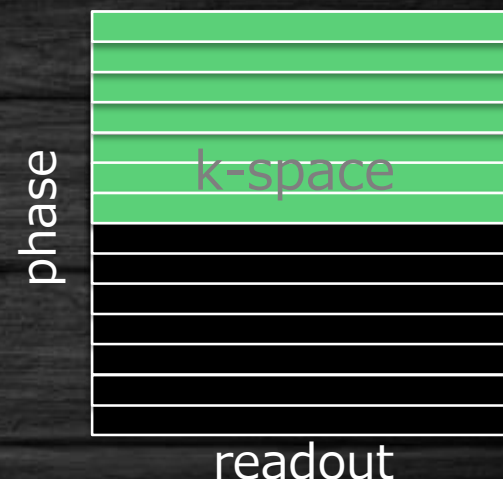
N phaseを減らす (For shortening the TA)

● Half Fourier (Phase Partial Fourier)

間引いたデータを反対側の測定データで補う
分解能は不変だが、SNRが低下

- ・ TA短縮
- ・ 空間分解能は不変
- ・ SNRは低下

○ ringingアーチファクト発生



【 Half Fourier 50%であれば 】

- ・ TA : 50sec (短縮)
- ・ Matrix size : 256×256
- ・ Pixel size : 1×1mm²
- ・ SNR : 71% (低下)



50%

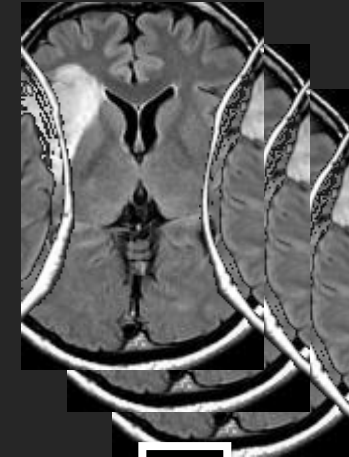
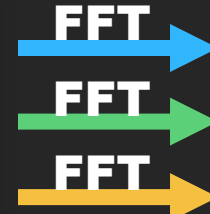
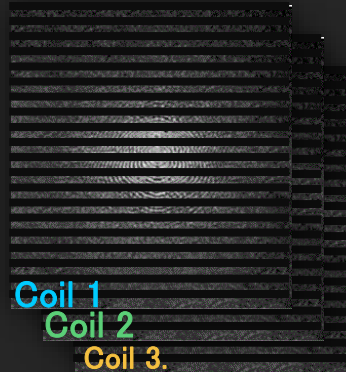
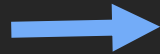
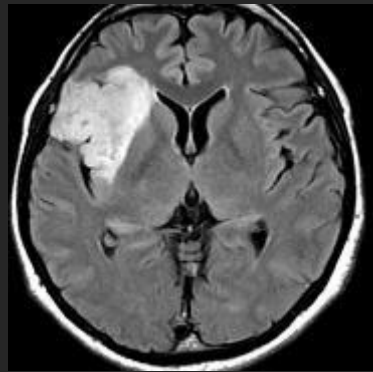


100%

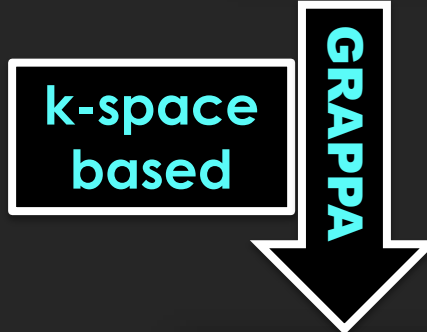
TRやN_{phase}以外で
時間を短縮する
方法は？



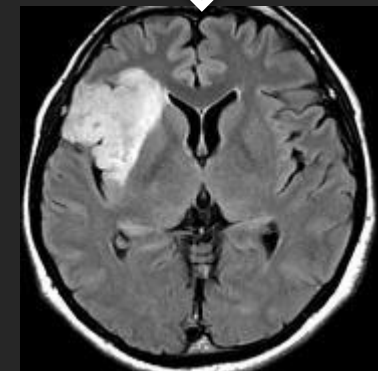
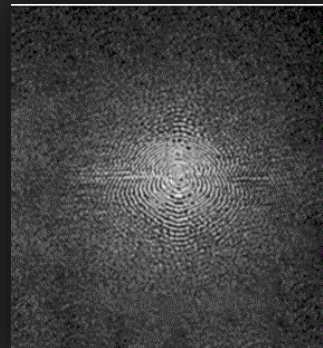
SENSE と GRAPPA



複数のコイル
で
データ収集



K-spaceを間引いて収集
+
コイル感度マップ



The principle of **GRAPPA**

各社のPIの種類

Image-based algorithms

- SENSE
- PLIS
- mSENSE
- ASEET
- SPEEDER
- RAPID

k-space-based algorithms

- SMASH
- Auto SMASH
- VD Auto SMASH
- **GRAPPA**
- ARC
- CAIPIRINHA

The history of evolution

k-space-based algorithms

Simultaneous Acquisition of Spatial Harmonics (SMASH): Fast Imaging with Radiofrequency Coil Arrays

Daniel K. Sodickson, Warren J. Manning

MRM 38:591–603 (1997)

AUTO-SMASH: A self-calibrating technique for SMASH imaging

Peter M. Jakob^{a,*}, Mark A. Griswold^a, Robert R. Edelman^a, Daniel K. Sodickson^b

Received 19 December 1997; received in revised form 17 March 1998; accepted 18 May 1998

Magnetic Resonance in Medicine 45:1066–1074 (2001)

VD-AUTO-SMASH Imaging

Robin M. Heidemann, Mark A. Griswold, Axel Haase, and Peter M. Jakob^{*}

Magnetic Resonance in Medicine 47:1202–1210 (2002)

Generalized Autocalibrating Partially Parallel Acquisitions (GRAPPA)

Mark A. Griswold,^{1*} Peter M. Jakob,¹ Robin M. Heidemann,¹ Mathias Nittka,²
Vladimir Jellus,² Jianmin Wang,² Berthold Kiefer,² and Axel Haase¹

SMASH, SENSE, PILS, GRAPPA

How to Choose the Optimal Method

Martin Blaimer, Felix Breuer, Matthias Mueller, Robin M. Heidemann, Mark A. Griswold, and Peter M. Jakob

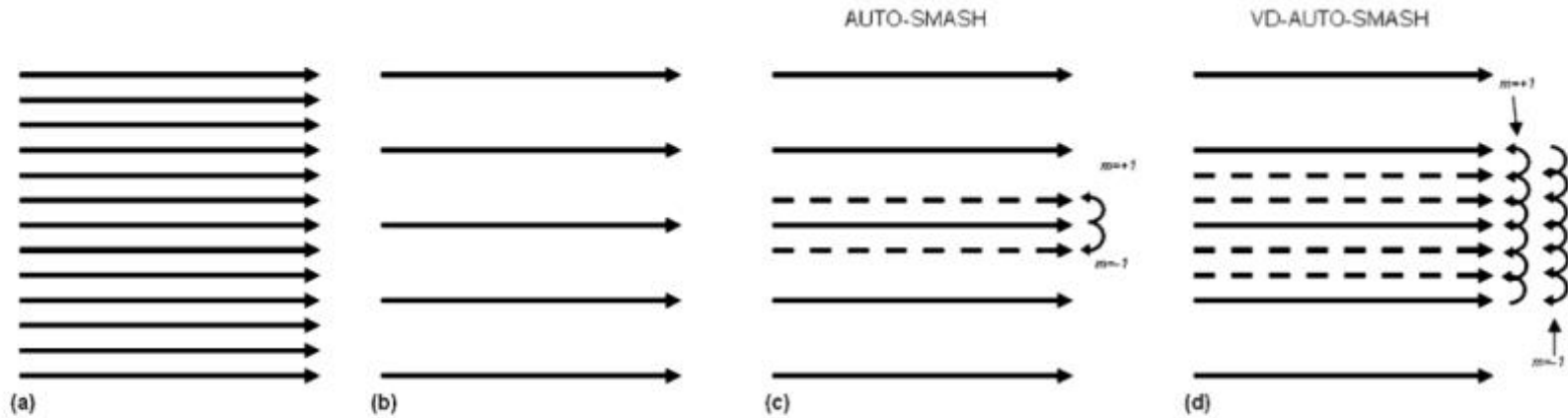
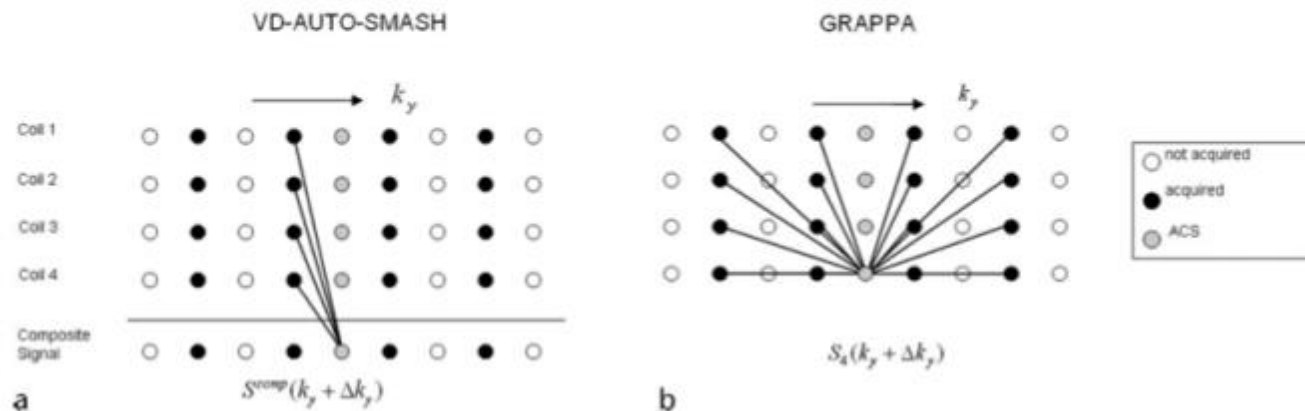


FIGURE
under
($m =$
weight

ラインデータの計算手法が進化している

type
- Δk
coil

FIGURE
an accelerated ($R = 2, 4$) AUTO-SMASH and VD-AUTO-SMASH reconstruction process. Each dot represents a line in k-space in a single coil of the receiver array. A single line from all coils is fit to a single ACS line in a sum-like composite k-space. B, GRAPPA uses multiple lines from all coils to fit one line in one coil (here coil 4). This procedure needs to be repeated for every coil, resulting in uncombined coil images, which can be finally combined using a sum of squares reconstruction.



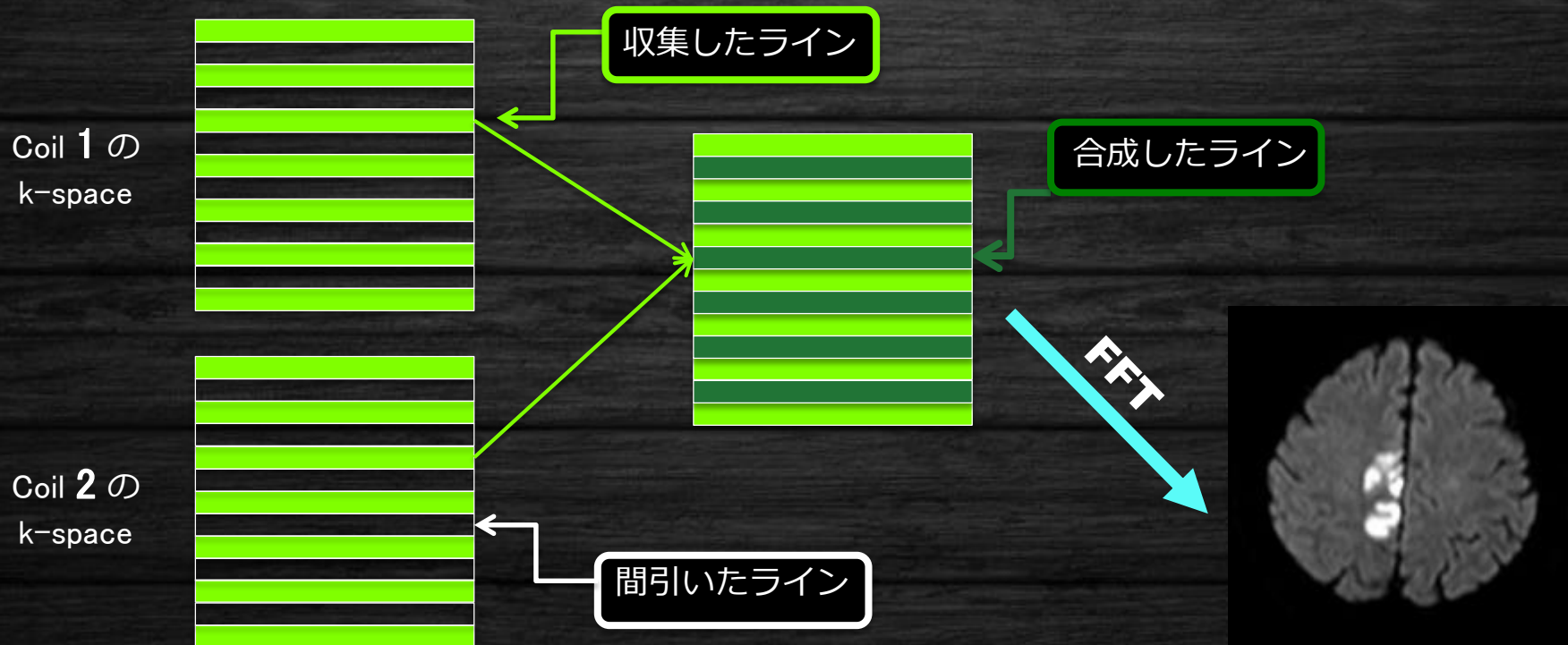
SMASH

特徴

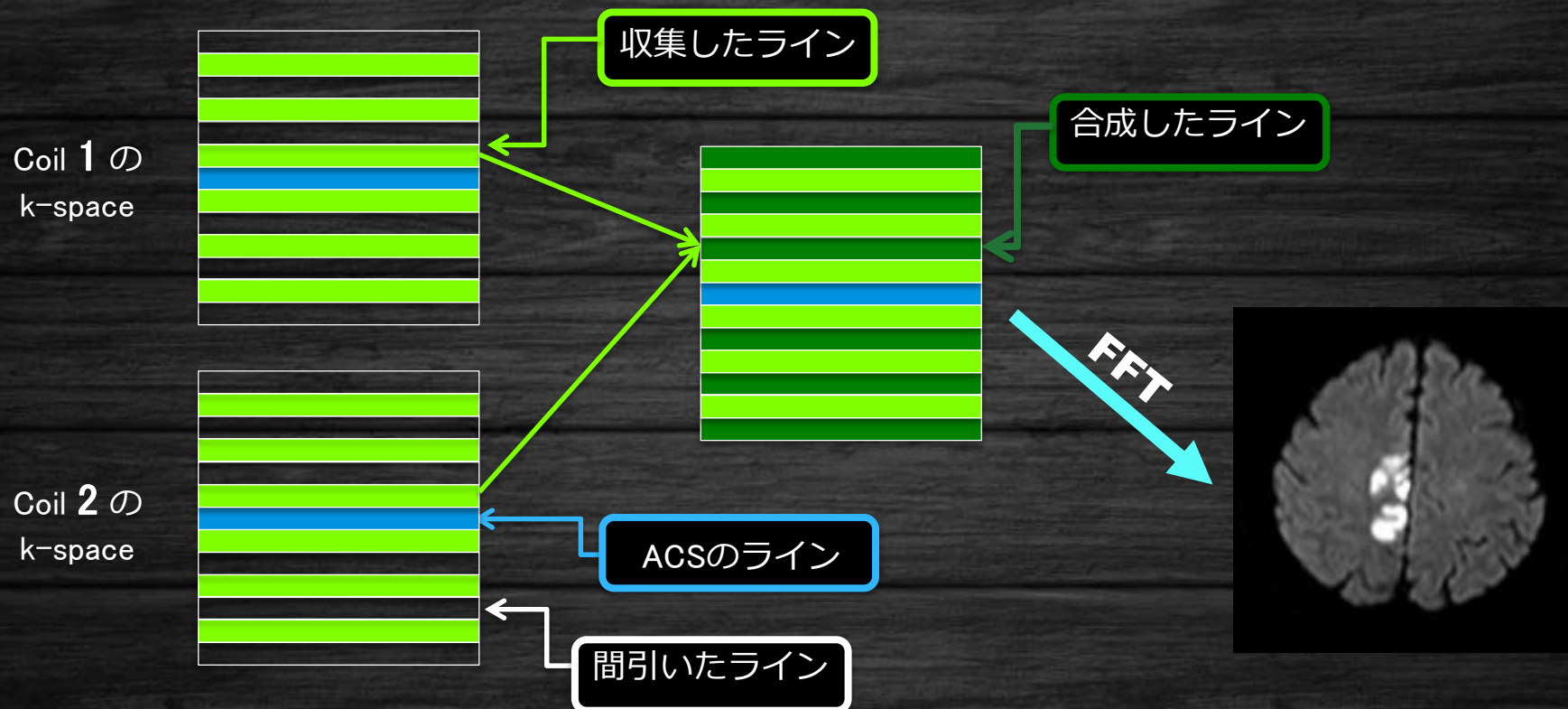
複数の位相エンコードstepを一回の位相エンコードから作り出す。計算により作り出す位相エンコードのラインデータをfittingという技術によって足りないraw dataを合成する (**spatial harmonics**)。この技術により、実際の位相エンコード数が減り撮像時間の短縮が可能になる。

課題

あらかじめ、撮像ごとにコイルの感度マップを収集している。これが、撮像時間の延長につながり、感度マップと本撮像で位置ズレが生じ、fittingできなくなる。



AUTO-SMASH



特徴

本撮像中に **auto calibration signal (ACS)** として k-space のデータを多めに収集し、fitting する手法。K-space 中心に充填されて画像再構成にも使用されるため、SNR の向上にも寄与する。

課題

k-space 上の間引いたデータは実際に収集した複数のラインを用いて合成しているため、位相エラーによるアーチファクトを含んでいたり、SNR が低いといった問題点もある。

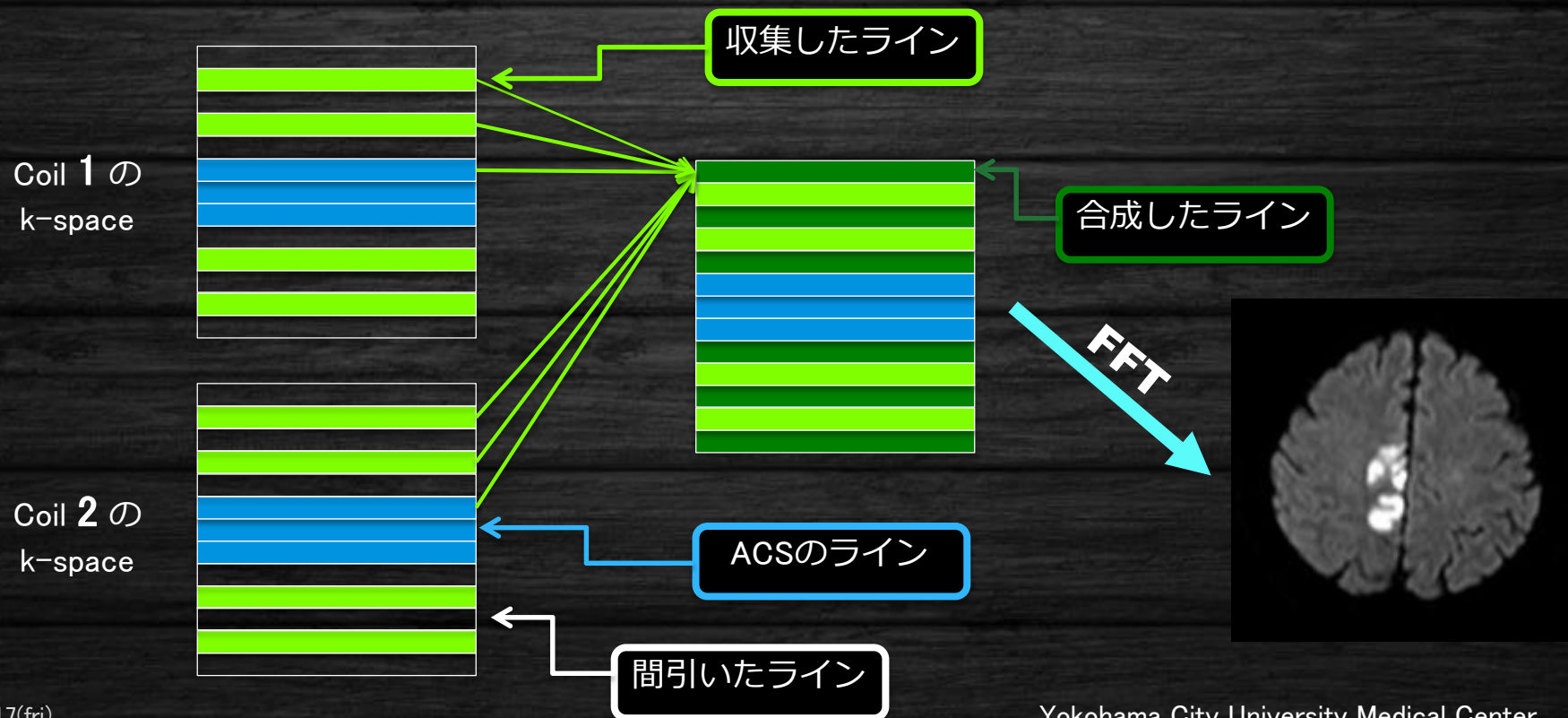
Variable Density -AUTO-SMASH

特徴

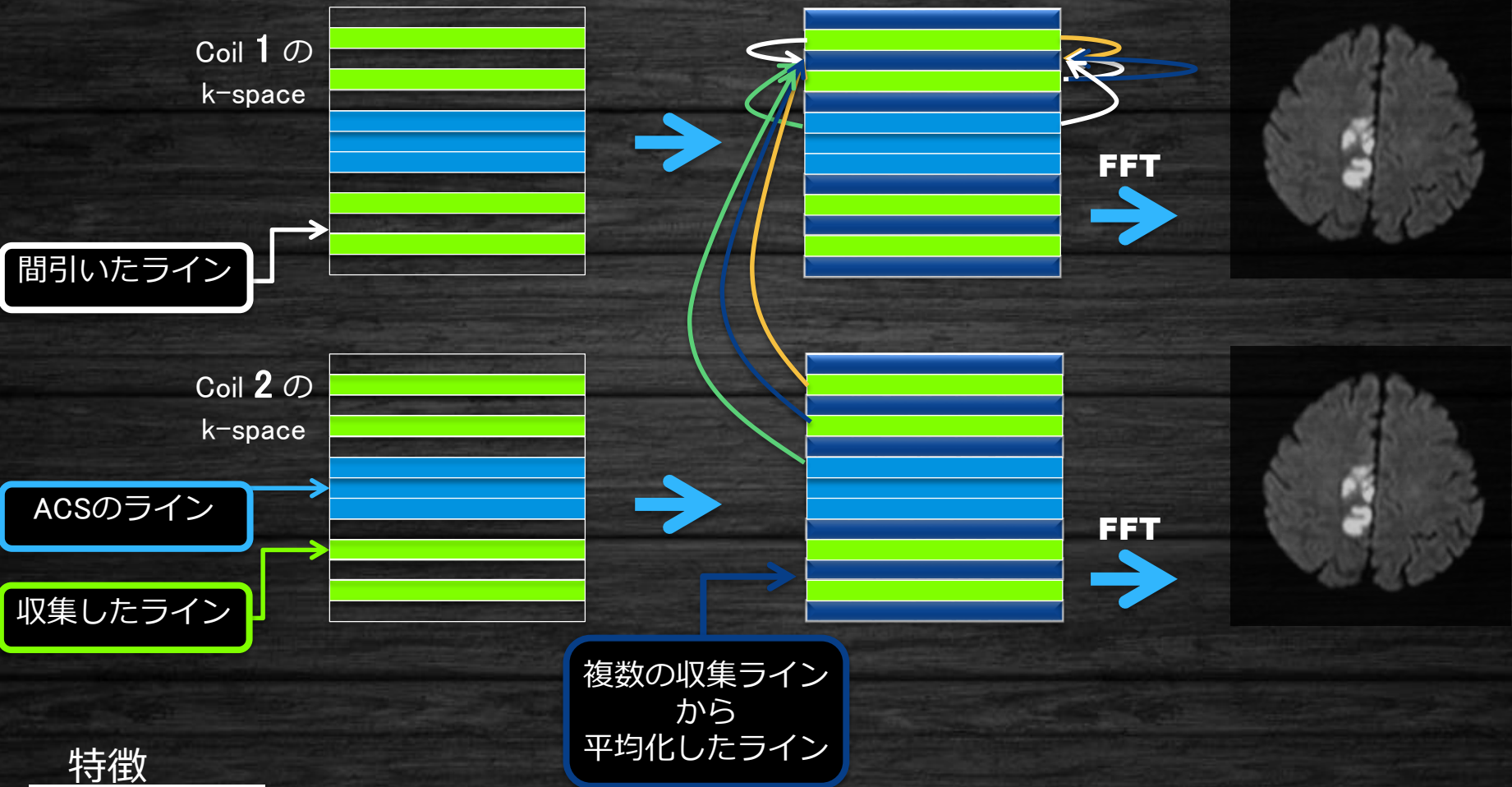
ACSのデータ収集は、k-space中心を密に行う。間引いたデータの合成には、各コイルからの**重み付け**を考慮し、**複数のライン**からfittingしている。
アーチファクト対策とSNRの向上を図る事が可能となった。

課題

位相ズレや算出した信号の誤差が大きい。SNRと同時にアーチファクトも増大してしまう。



GRAPPA



特徴

ACSデータを利用して、コイルごとに**Sliding block approach**というアルゴリズムを用いて収集した複数ラインから平均化して間引いたデータを合成している。

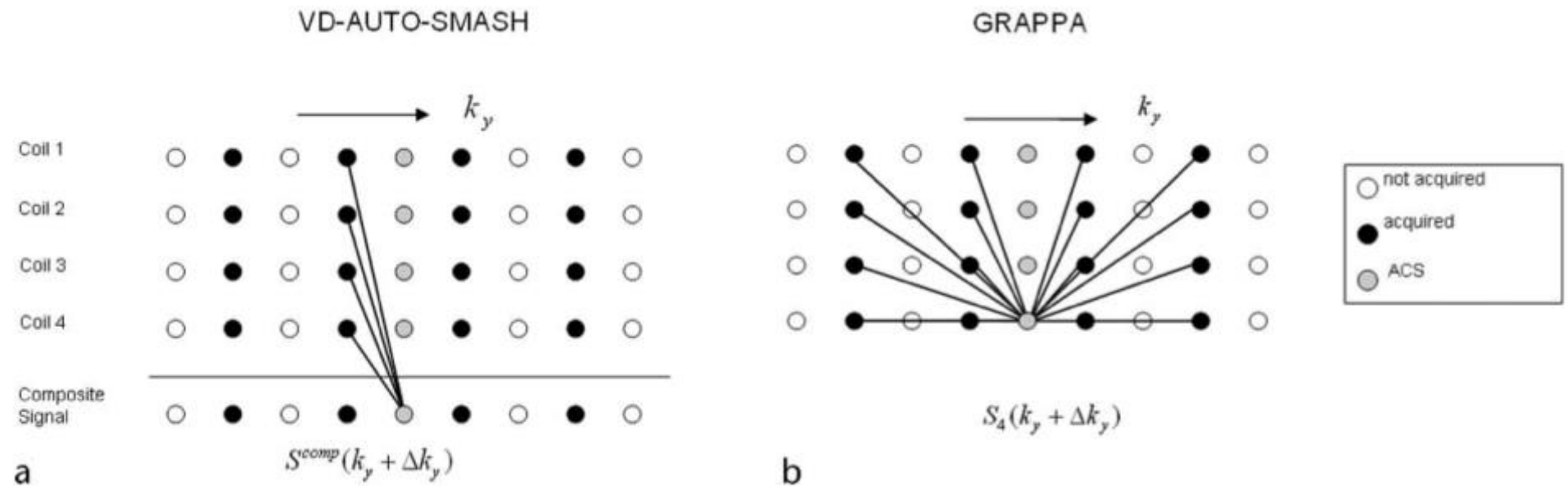
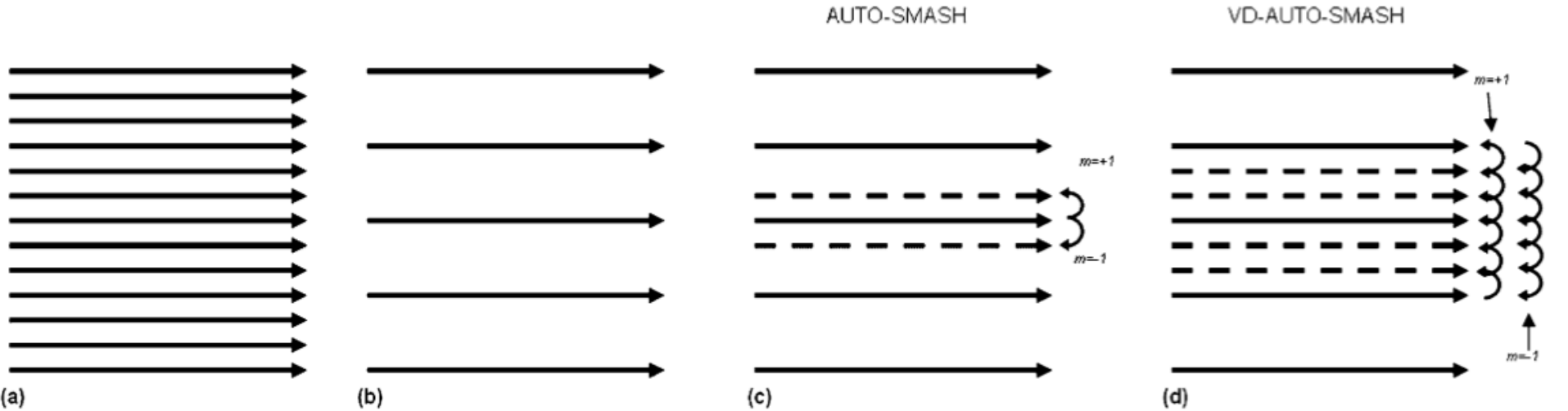
これを通常のアレイコイルの再構成方法と同じように画像を足し合わせる。

- 多くのACS lineをfittingに利用する事で、展開精度とSNRの向上に寄与
- magnitude画像の合成なので、位相エラーによる信号損失を防げる

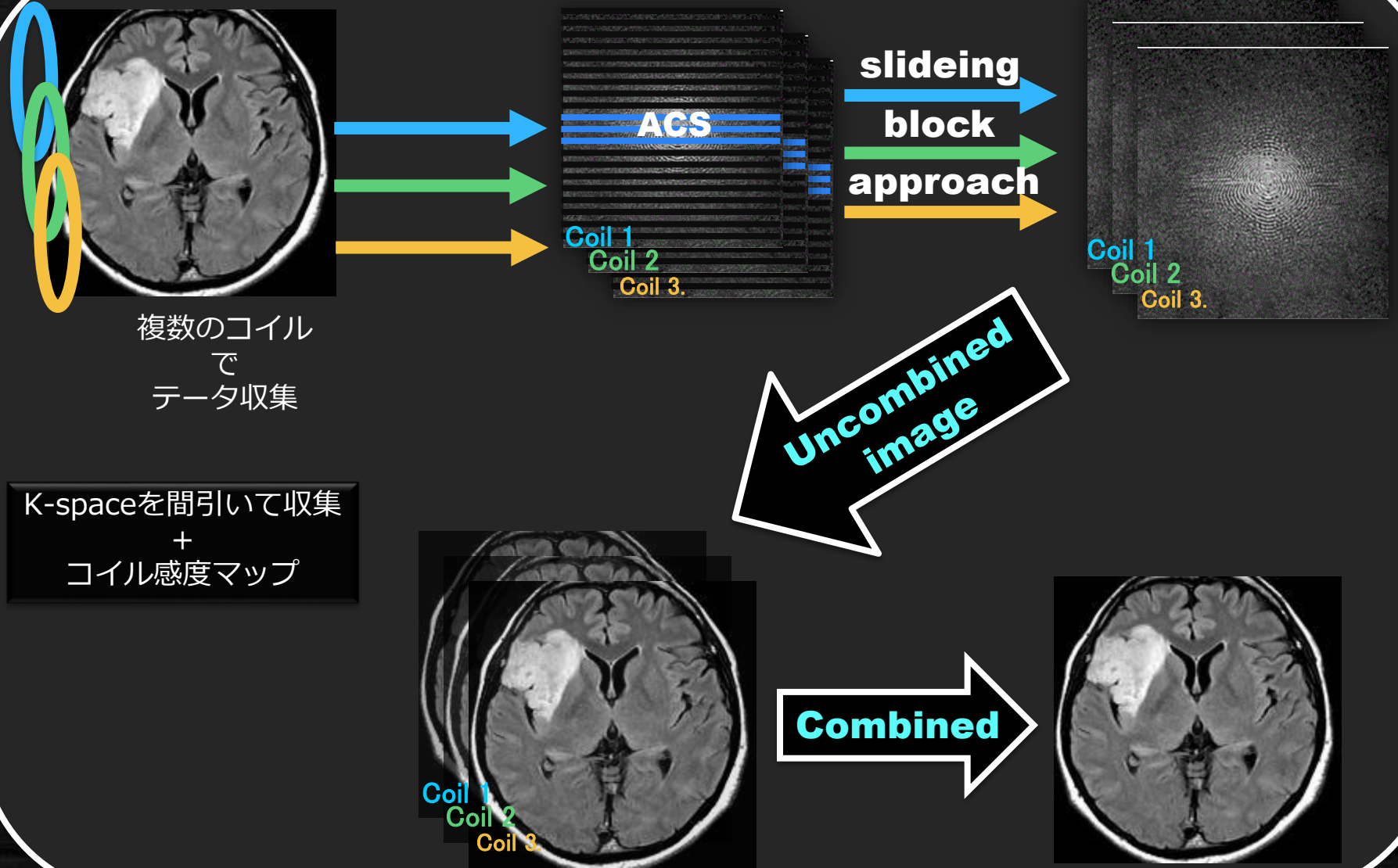
SMASH, SENSE, PILS, GRAPPA

How to Choose the Optimal Method

Martin Blaimer, Felix Breuer, Matthias Mueller, Robin M. Heidemann, Mark A. Griswold, and Peter M. Jakob



GRAPPA





イタリア特産の蒸留酒で、**ブランデー**の一種。
ワインを蒸留して作る一般的なブランデーとは違い、
ポマース（ブドウの搾りかす）を発酵させたアルコールを蒸留して作る。

Characteristic of GRAPPA

GRAPPAの特徴

- k-spaceを間引く
Redaction - Factor
- Reference line (ACS)を変える
geometry - factor
- Δk を変える
phase over sampling

PIのSNR

差分map法



日本放射線技術学会研究班
『MR画像のParallel imagingにおける
SNR測定法の標準化』
2006



SNR_{PI} MAP

=



SNR_{conv} MAP



g-factor MAP

$\sqrt{\text{R-factor}}$

- 複数のコイル感度分布を利用して、感度補正、計算による画像展開
 → 雑音が不均一、アーチファクトも発生
 → voxel単位で考える

What happens
if you change the

Reduction Factor?

k-spaceを間引く

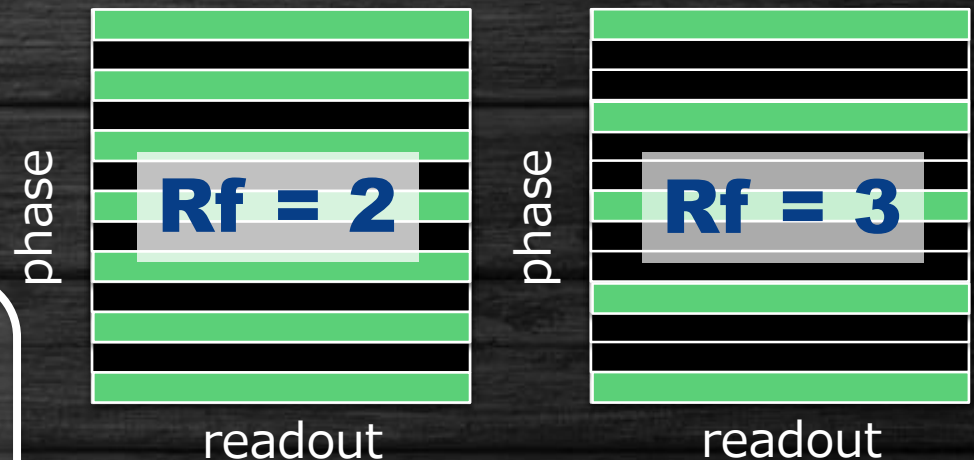
$$\text{SNR}_{PI} = \frac{\text{SNR}_{\text{conventional}}}{\text{g-factor} \sqrt{\text{R-factor}}}$$

各社Reduction Factorの呼び名

- ASSET factor
- Acceleration factor
- Pat factor
- SENSE factor

「倍速を表す指標」

実際は、
何行に1回の割合で
k-spaceをencodeするか



k-spaceを間引く

$$\text{SNR}_{PI} = \frac{\text{SNR}_{\text{conventional}}}{\text{g-factor} \sqrt{\text{R-factor}}}$$

「計算で正確に戻す指標」

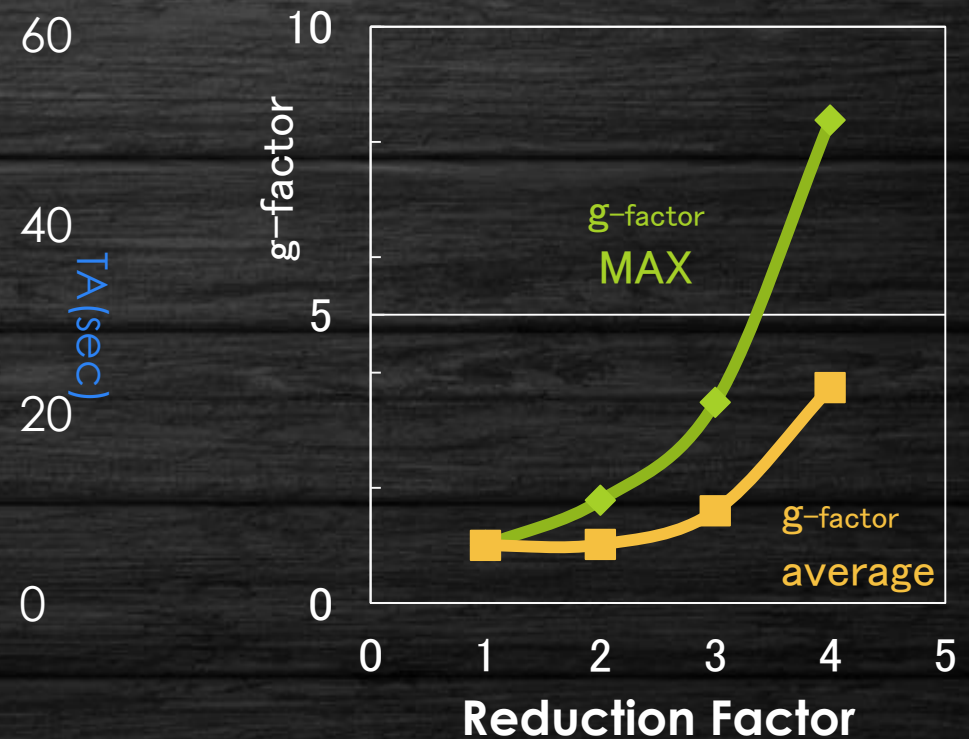
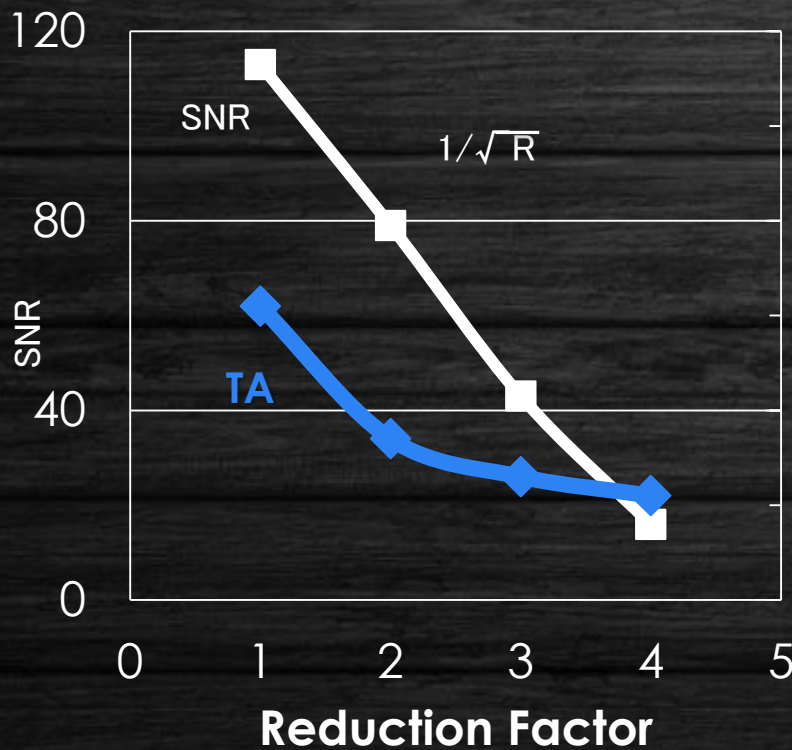
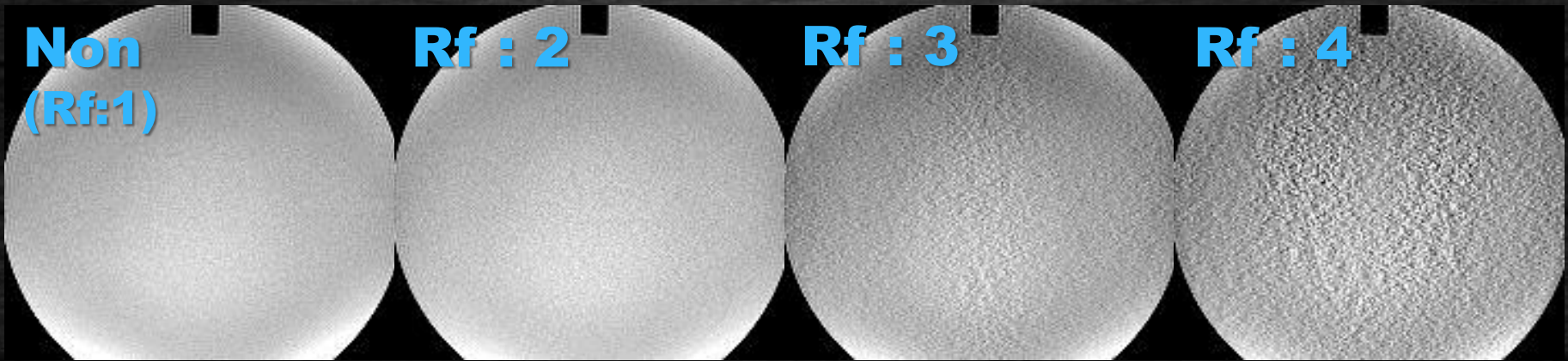
1以上の値になる

Geometry – Factorに影響する要因

- アレイコイル
 - ・ エLEMENT数 / 幾何学的な配置
- 画像展開アルゴリズム
- リダクション・ファクター

Reduction Factorを変える

Matrix : 256 , Reference Line : 32

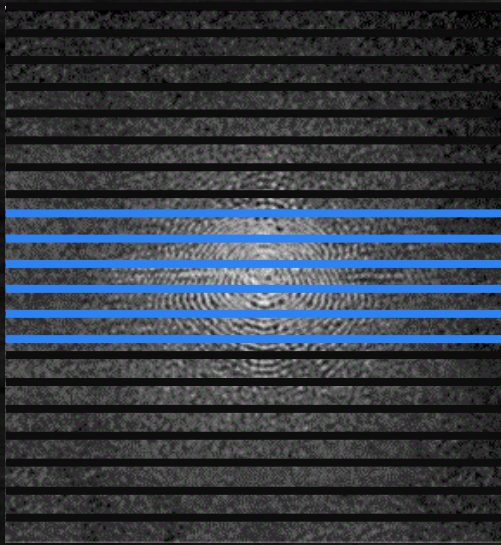


What happens
if you change the

Reference Line?

(ACS)

Reference Line



Reference
Line

k-space centerの数ラインを密に収集したデータから、コイルの感度マップを作成。

本スキャンの中にリファレンススキャンが組み込まれている。

Self calibration法なので、動きの影響を少なく出来る。

「感度補正に使用するk-spaceのライン数」

増やすと展開エラーも減少するが、TAも延長する。

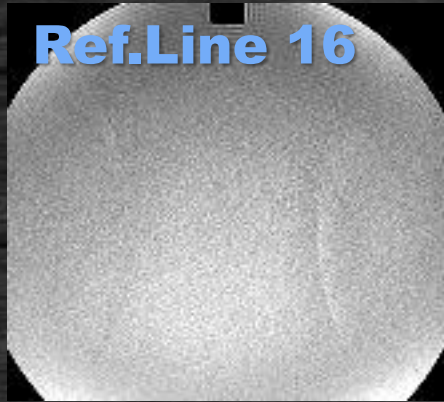
Reference Lineを変える

Matrix : 256 , Reduction factor : 2

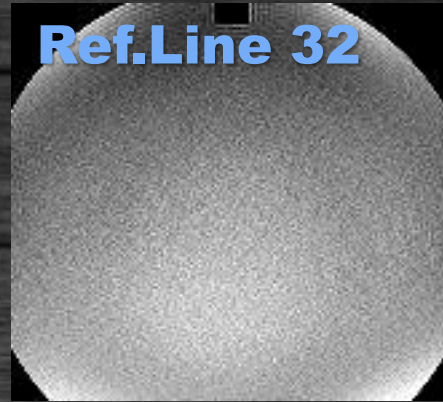
Ref.Line 8



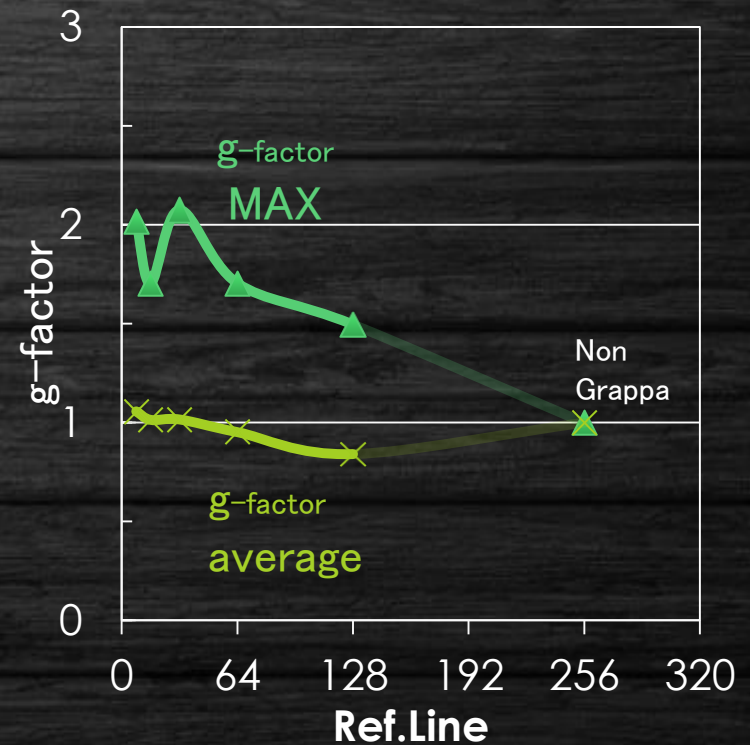
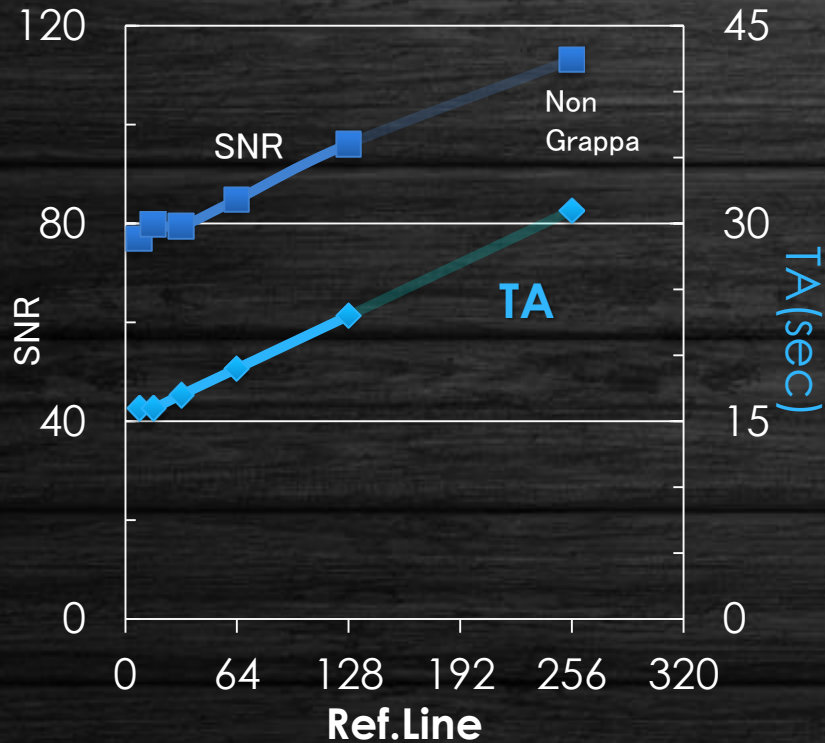
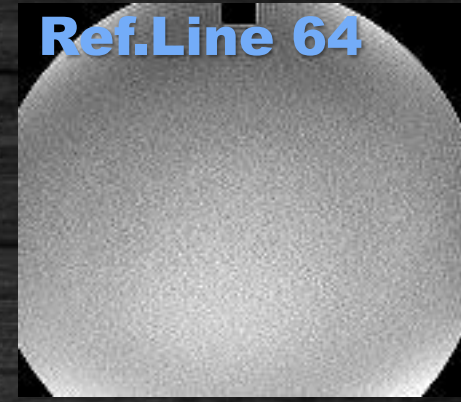
Ref.Line 16



Ref.Line 32



Ref.Line 64



What happens
if you change the

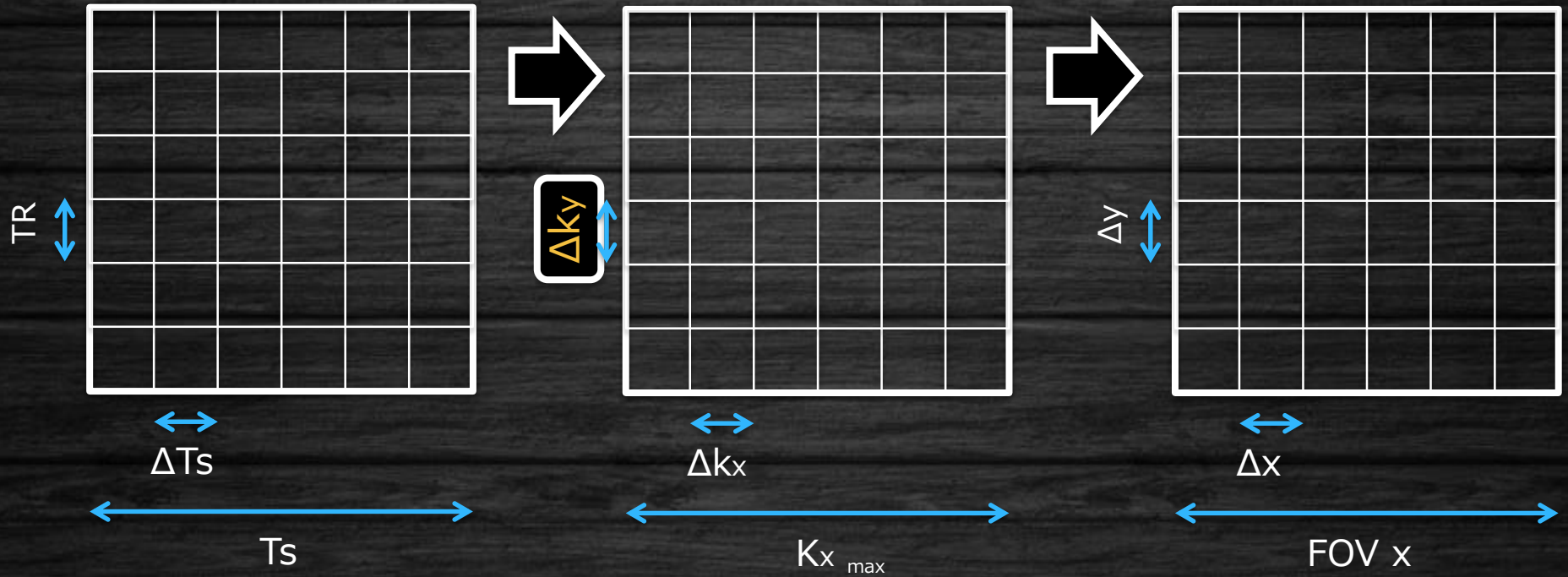
Δ ky



データ空間

k空間

画像



時間領域

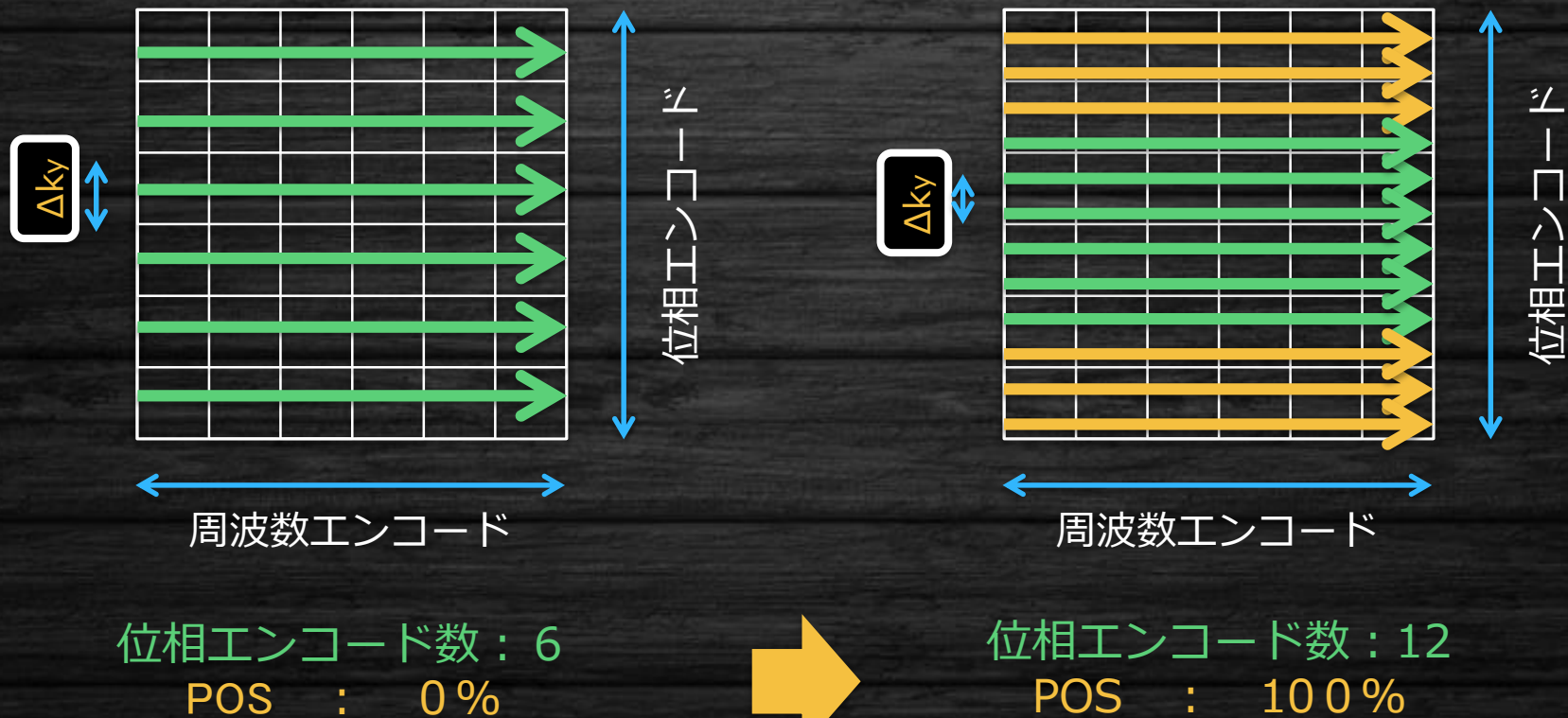
空間周波数領域

周波数領域

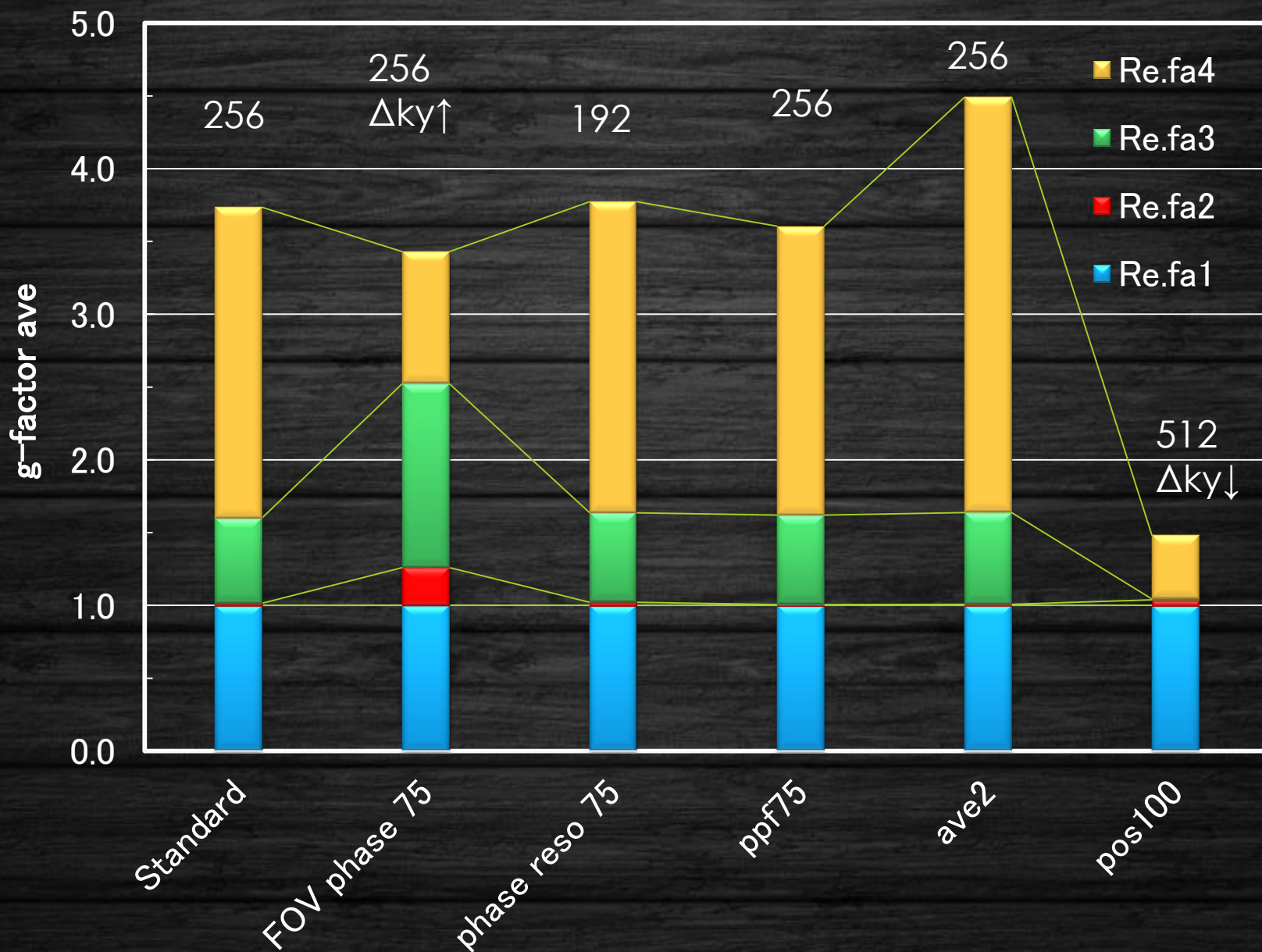
Phase Over Smampling

「位相エンコード方向の折り返しアーチファクトを防止」

サンプリングする位相エンコード方向のデータ Δky を増やす事

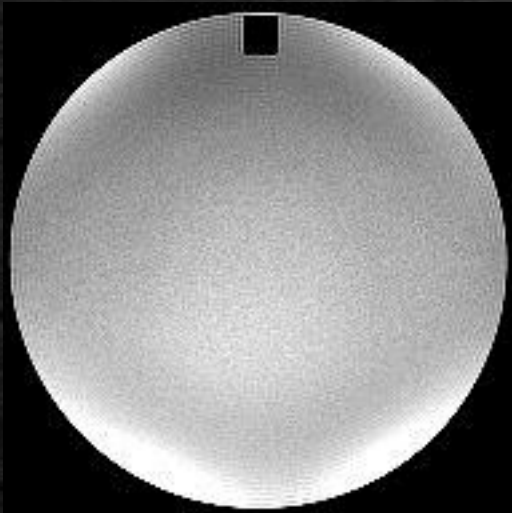


位相エンコード数の違いによるg-factor_{ave}の変化



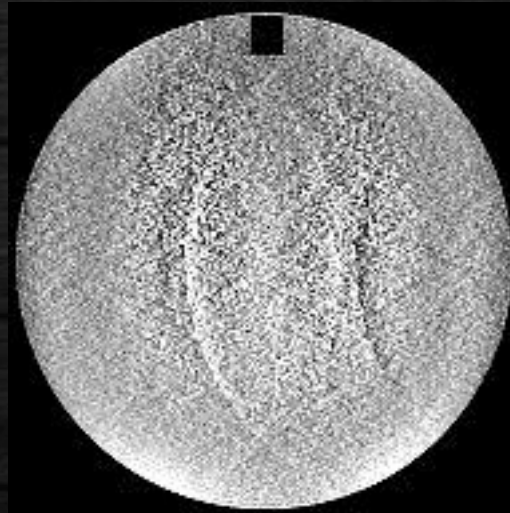
位相エンコード数の違いによるg-factor_{ave}の変化

Conventional
Scan
matrix : 256×256
POS : 0%



SNR : 112

Red-fac : 8
Ref.line : 32
matrix : 256×256
POS : 0%

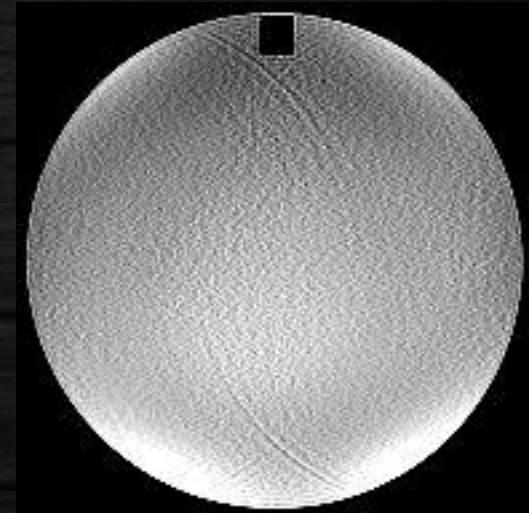


SNR_{PI} : 9.4

G-fac_{ave} : 4.5

G-fac_{max} : 9.4

Red-fac : 8
Ref.line : 32
matrix : 256×256
POS : 100%



SNR_{PI} : 48

G-fac_{ave} : 1.1

G-fac_{max} : 2.2

GRAPPA法の基礎と特徴

Parallel Imaging ?

Multi coil , 時間短縮

GRAPPAの原理

SMASH → GRAPPA

GRAPPAの特徴

Reduction Factor , Reference Line , Δk_y

参考資料

- ・ 今井広、差分マップ法および連続撮像法によるParallel MRI画像のSNR測定、日本放射線技術学会雑誌64(8)
- ・ 奥秋 知幸、6. 臨床応用 (4) -MRI の画像再構成 (パラレルイメージング法)、日本放射線技術学会雑誌Vol. 70(2014)No.10
- ・ 丸山克也、パラレルイメージングの原理・特徴、映像情報2003(1)
- ・ 水内宣夫、Parallel Imaging(mSENSE,GRAPPA)およびPACEとHyperecho、映像情報メディカル2003(1)vol34,No.6
- ・ 室伊三男、k空間 (k-space) の特徴、日本放射線技術学会雑誌Vol.59(2003)No.7
- ・ 荒木力、決定版MRI完全解説、秀潤社
- ・ 蜂谷順一、改訂版MRI応用自在、MEDICAL VIEW