

イメージング勾配：設計法と具体例

ハンズオンセミナー パルスシーケンスの設計 HS1-1

2021年9月11日(土) 16:00-18:00

山梨大学 医学部 先端医用画像学講座

玉田大輝

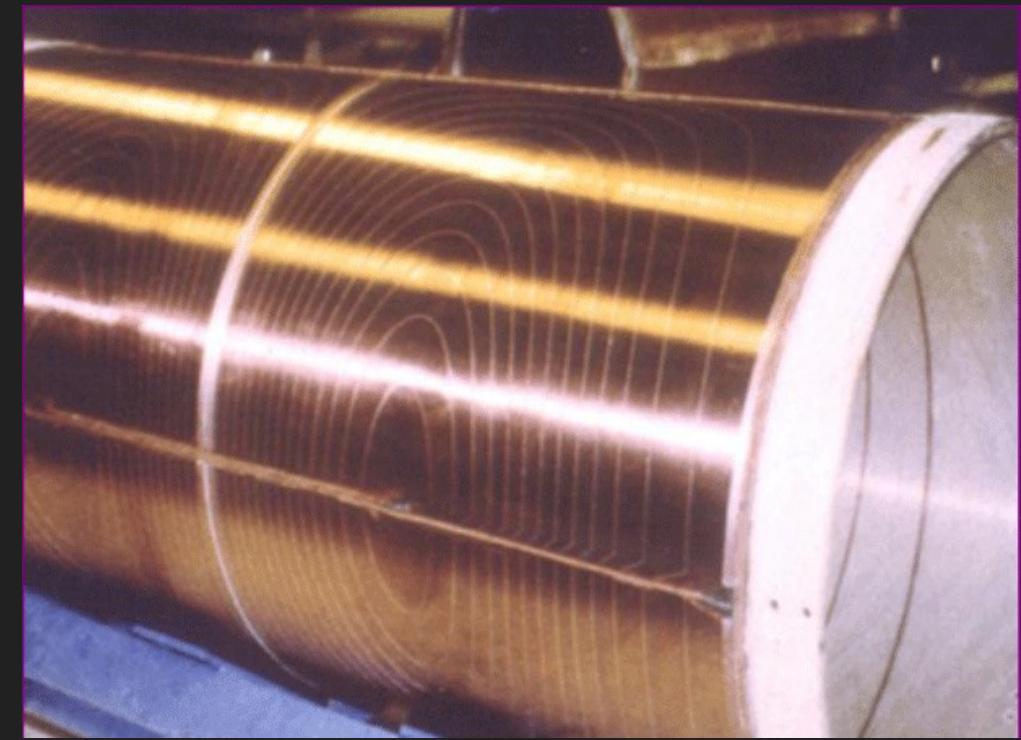
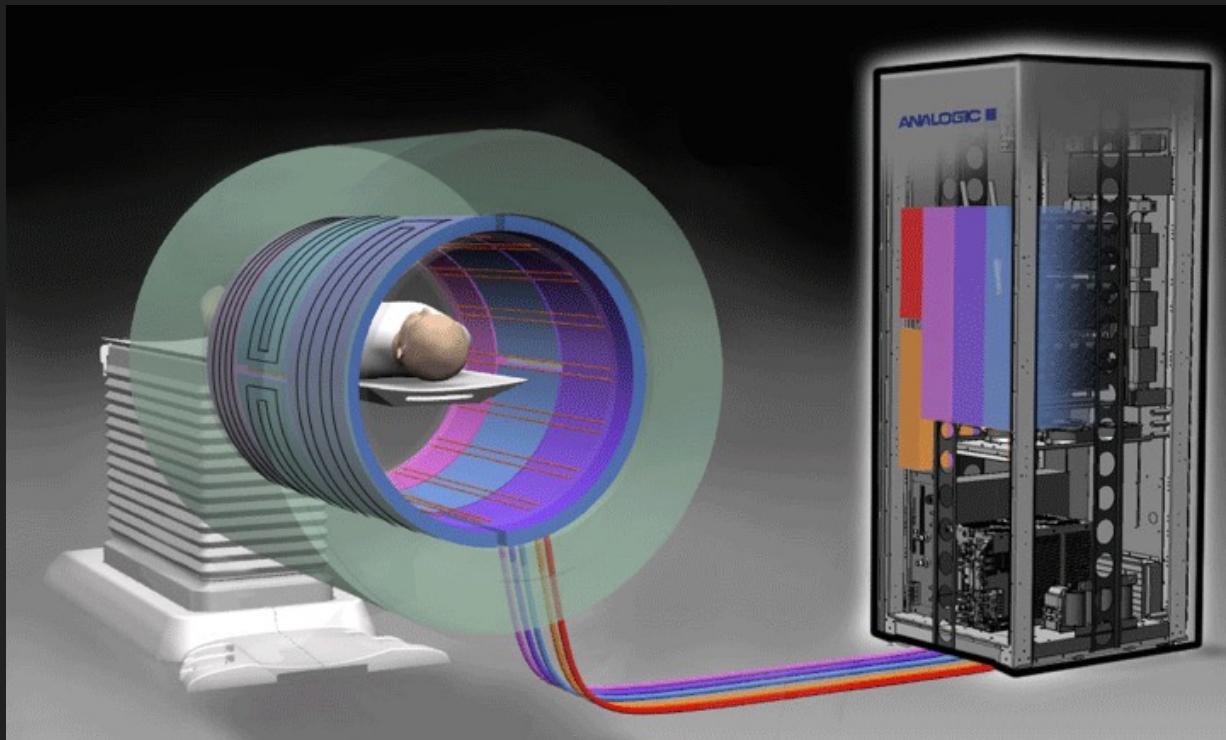


本発表の内容に関連する 利益相反事項は

ありません



勾配磁場



勾配磁場：MRI登場以前

VOLUME 80, NUMBER 4

Spin Echoes*†

E. L. HAHN‡

Physics Department, University of Illinois, Urbana, Illinois

(Received May 22, 1950)

Nature 1973; 242: 190-191

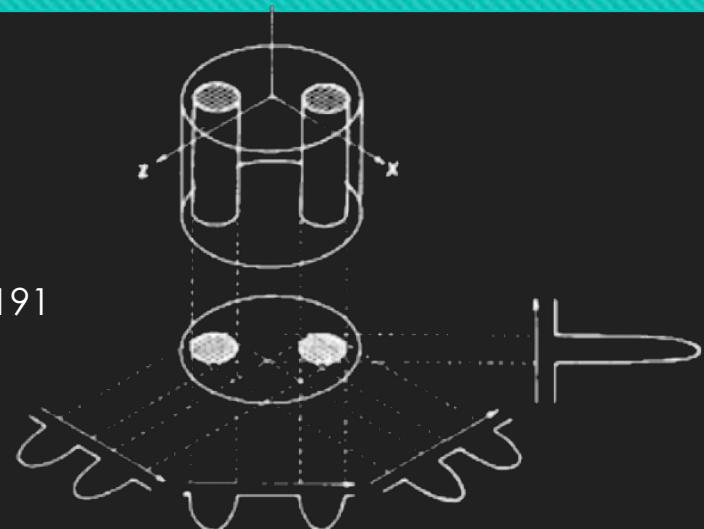


Fig. 1 Relationship between a three-dimensional object, its two-dimensional projection along the Y-axis, and four one-dimensional projections at 45° intervals in the XZ-plane. The arrows indicate the gradient directions.

THE JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS VOLUME 43, NUMBER 10 15 NOVEMBER 1965

Use of Spin Echoes in a Pulsed Magnetic-Field Gradient to Study Anisotropic, Restricted Diffusion and Flow*

E. O. STEJSKAL

Department of Chemistry, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin and Central Research Department, Monsanto Company, St. Louis, Missouri†

(Received 19 April 1965)



Paul C. Lauterbur

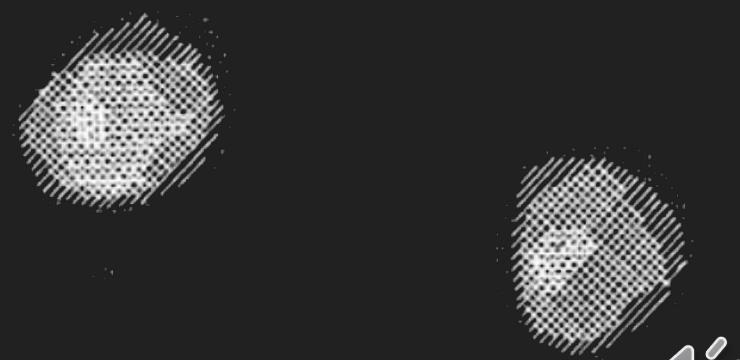
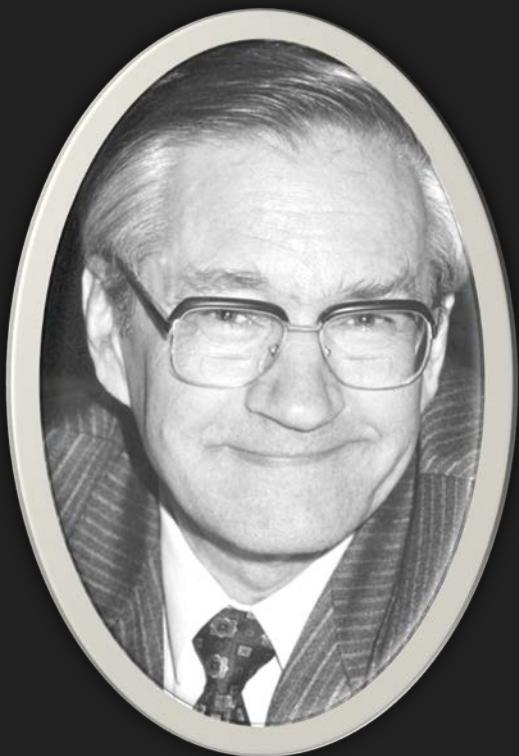


Fig. 2 Proton nuclear magnetic resonance zeugmatogram of the object described in the text, using four relative orientations of the object and gradients as diagrammed in Fig. 1.



勾配磁場：フーリエ変換MRI



Richard R. Ernst

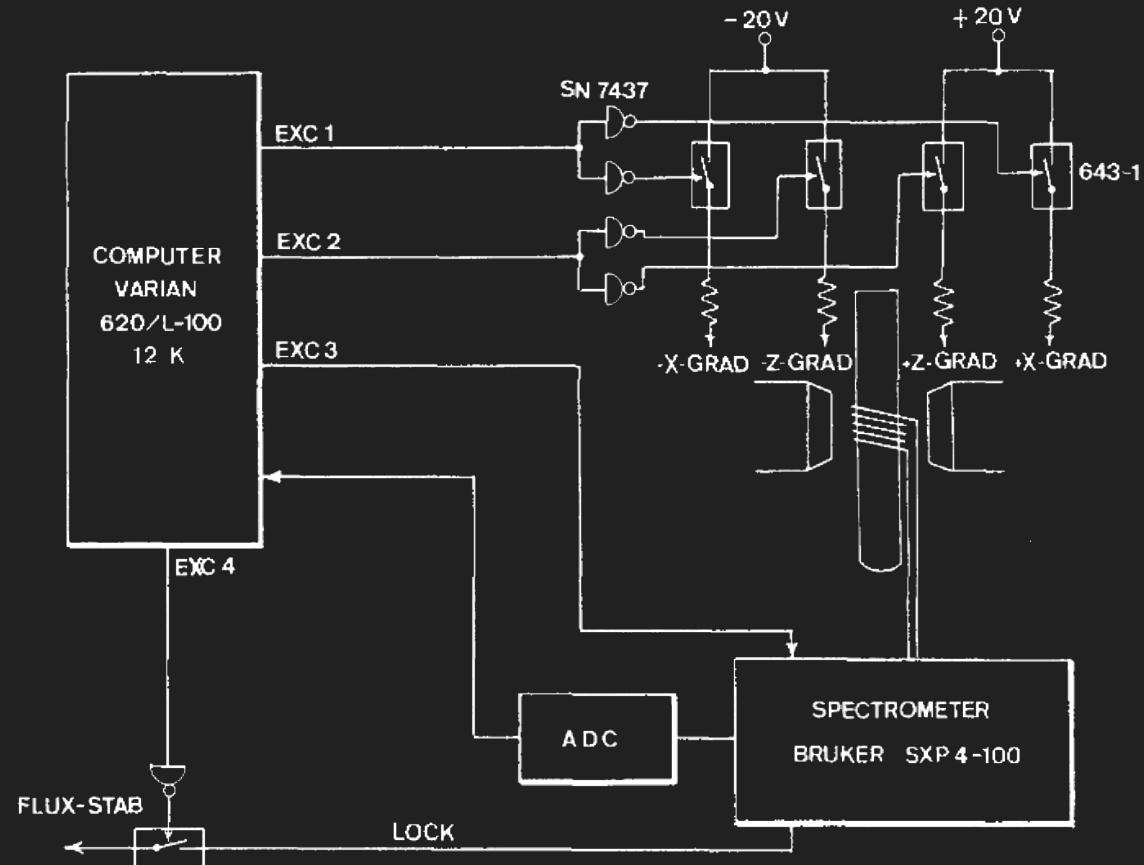
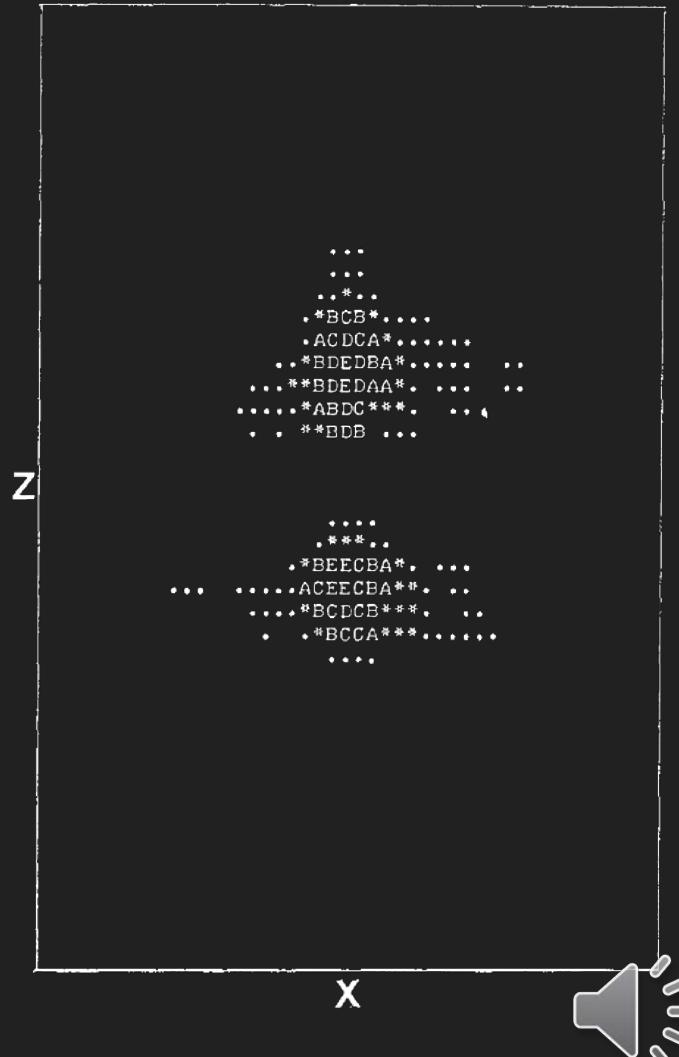


FIG. 2. Block diagram of the experimental set-up.

Kumar A, Welti D, Ernst RR. NMR Fourier zeugmatography. J Magn Res 1975; 18: 69-83.

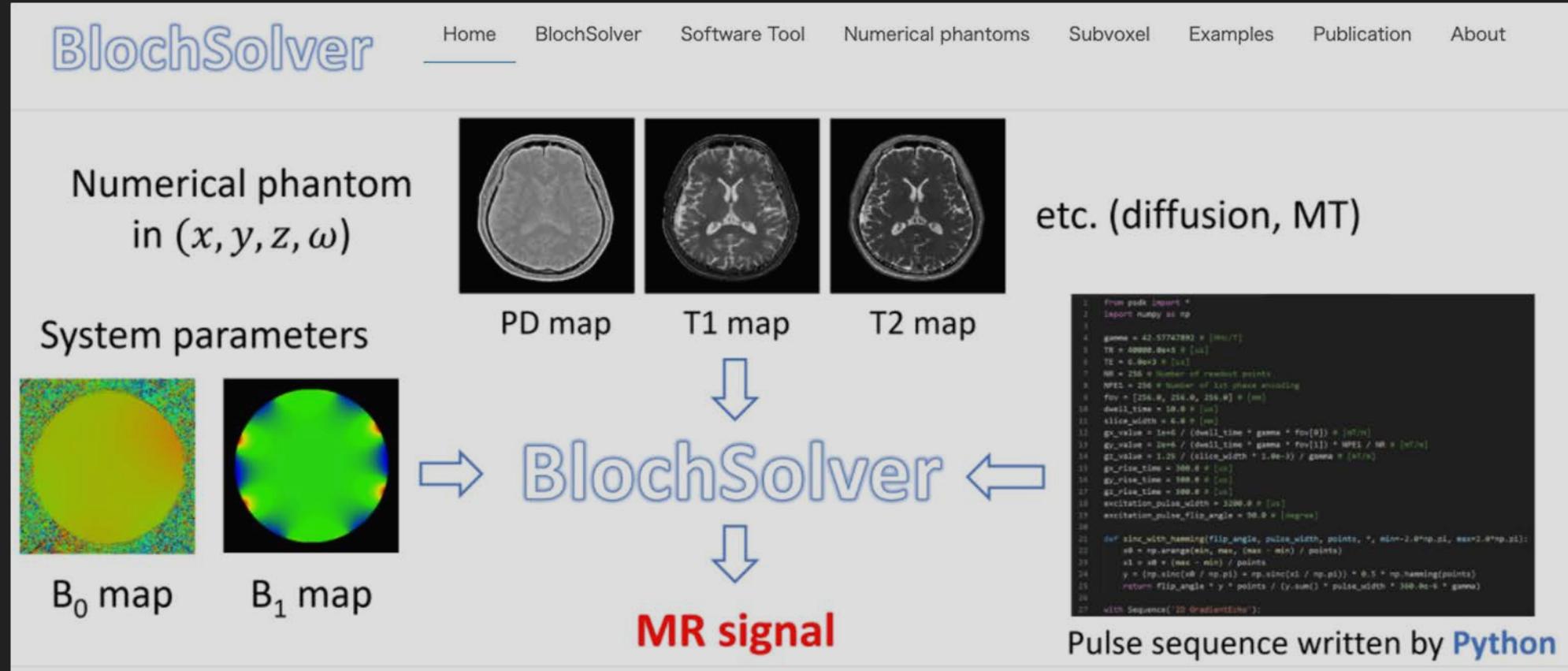


目的

- 実際のシーケンス実装を通して、イメージング勾配の役割を解説
- MRIシミュレータを使用
- 例として、勾配エコー法を使用
- 主に以下の役割を説明
 - リードアウト
 - スポイラー
 - 位相エンコード
 - スライス選択

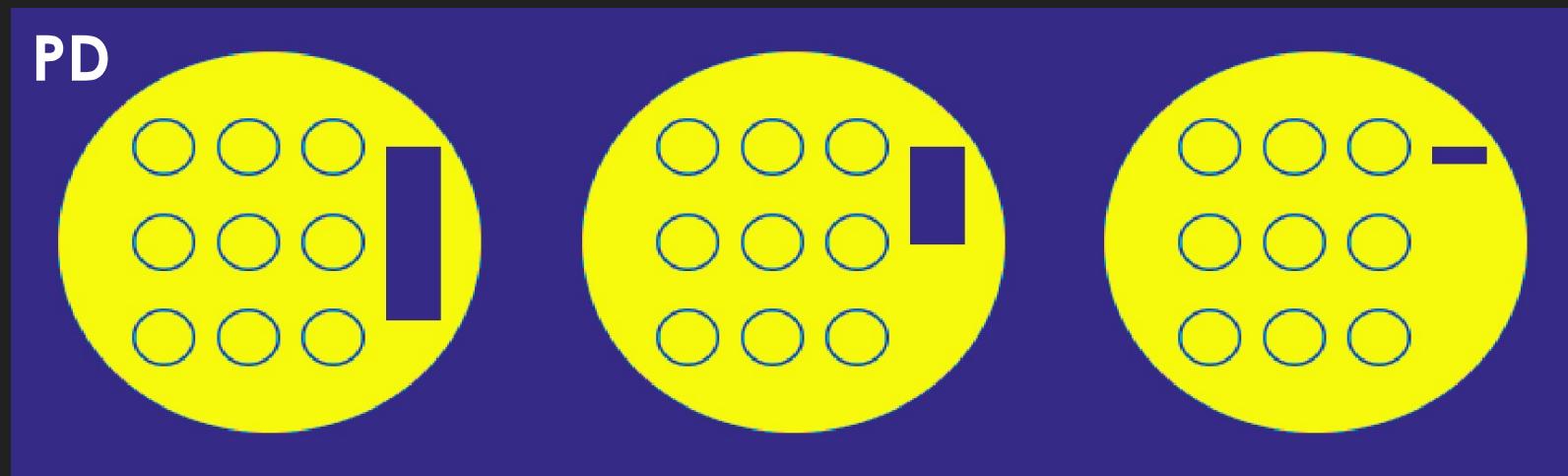


イメージング勾配の設計：シミュレータ



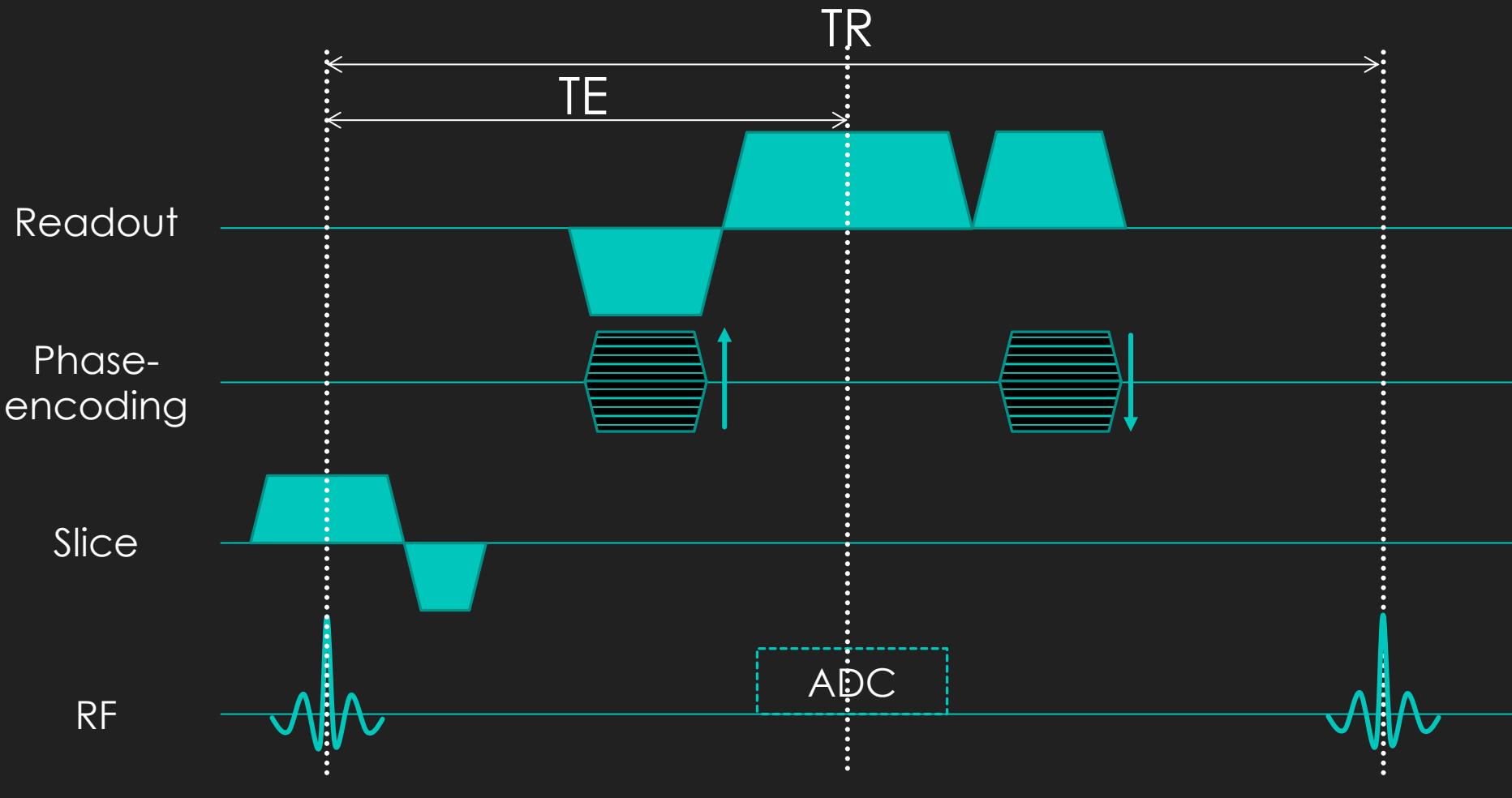
Kose, Ryoichi, and Katsumi Kose. "BlochSolver: A GPU-optimized fast 3D MRI simulator for experimentally compatible pulse sequences." *Journal of Magnetic Resonance* 281 (2017): 51-65.

イメージング勾配の設計：ファンтом



勾配パルスの例

ソースコードは次のURLで公開しています：
https://github.com/dtamadauw/BlochSolverCode_JSMRM2021



FIDを収集する

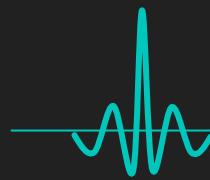
ソースコードは次のURLで公開しています：
https://github.com/dtamadauw/BlochSolverCode_JSMRM2021

Readout

Phase-
encoding

Slice

RF



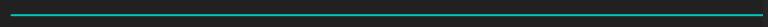
ADC



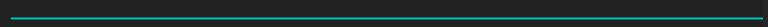
FIDを収集する

ソースコードは次のURLで公開しています：
https://github.com/dtamadauw/BlochSolverCode_JSMRM2021

Readout



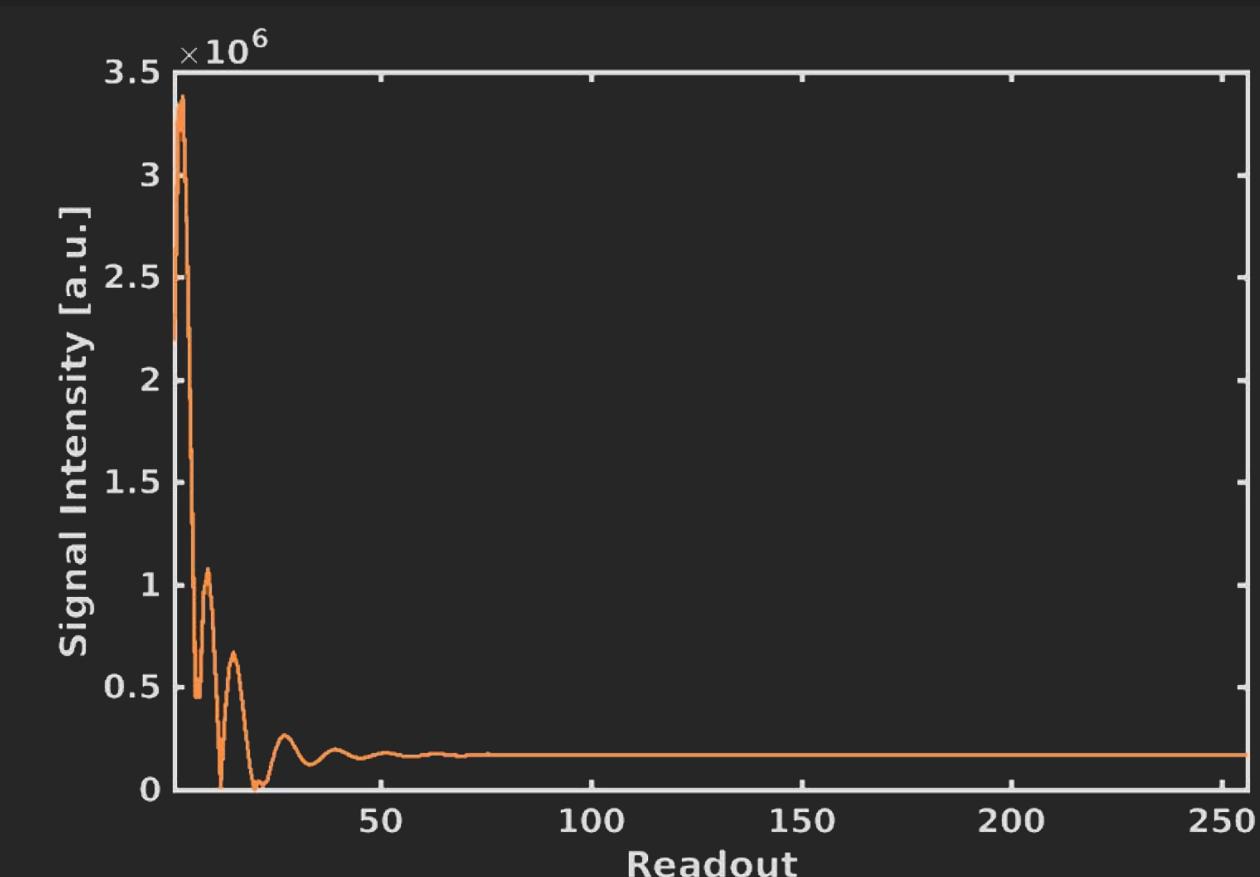
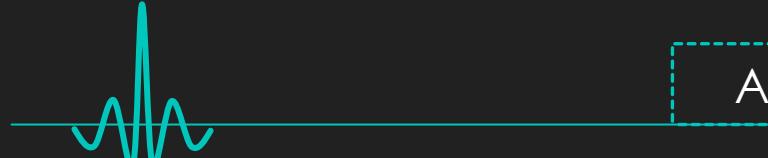
Phase-encoding



Slice



RF



ADC

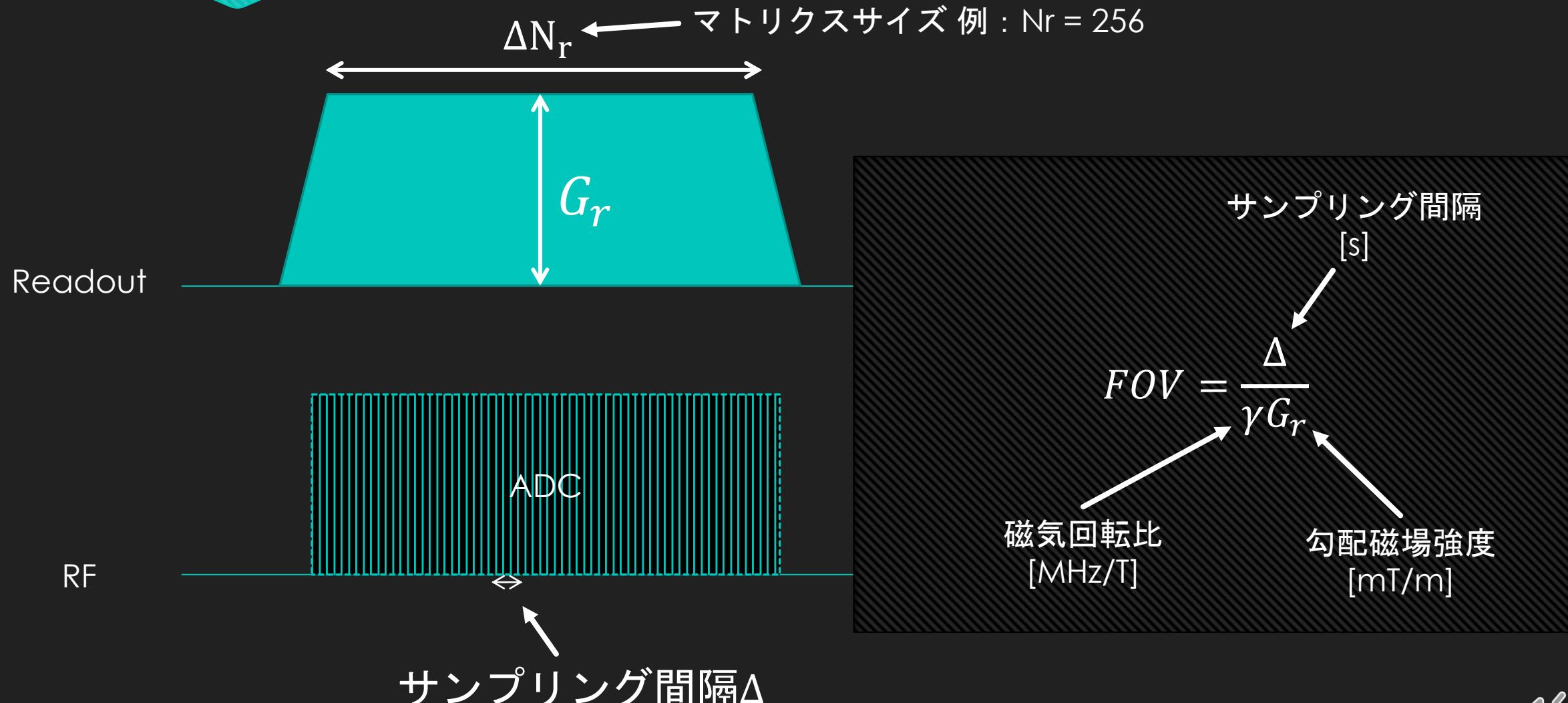


リードアウト勾配

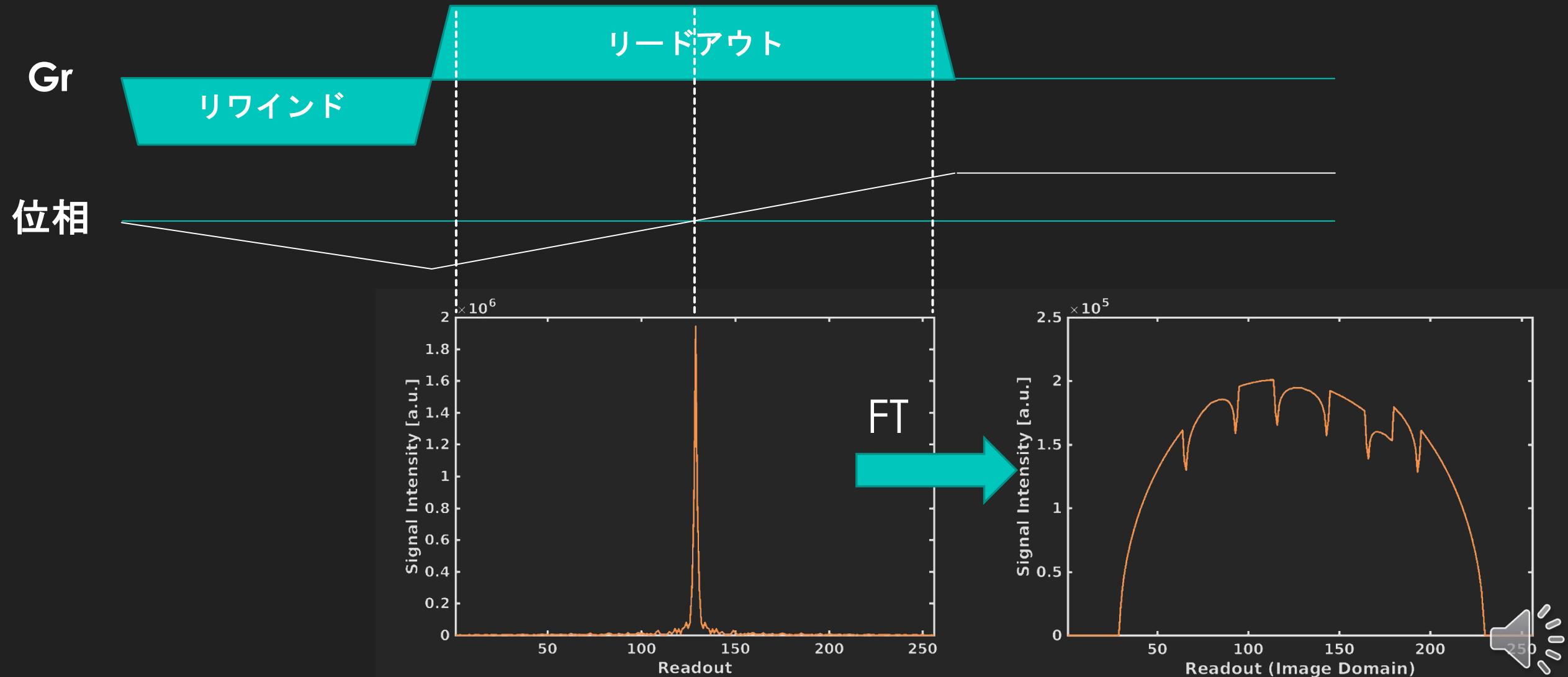
ソースコードは次のURLで公開しています：
https://github.com/dtamadauw/BlochSolverCode_JSMRM2021



リードアウト勾配：FOVと勾配磁場強度

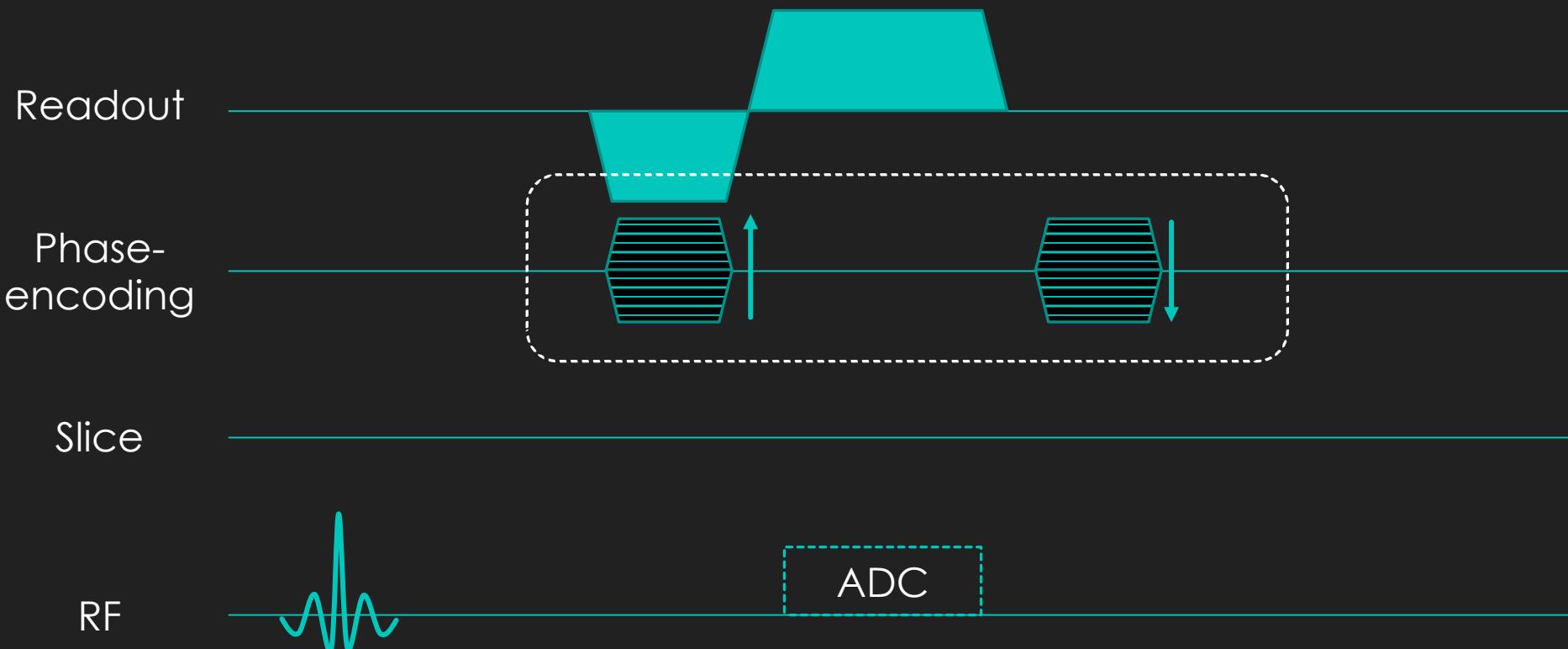


リードアウト勾配：リワインダ

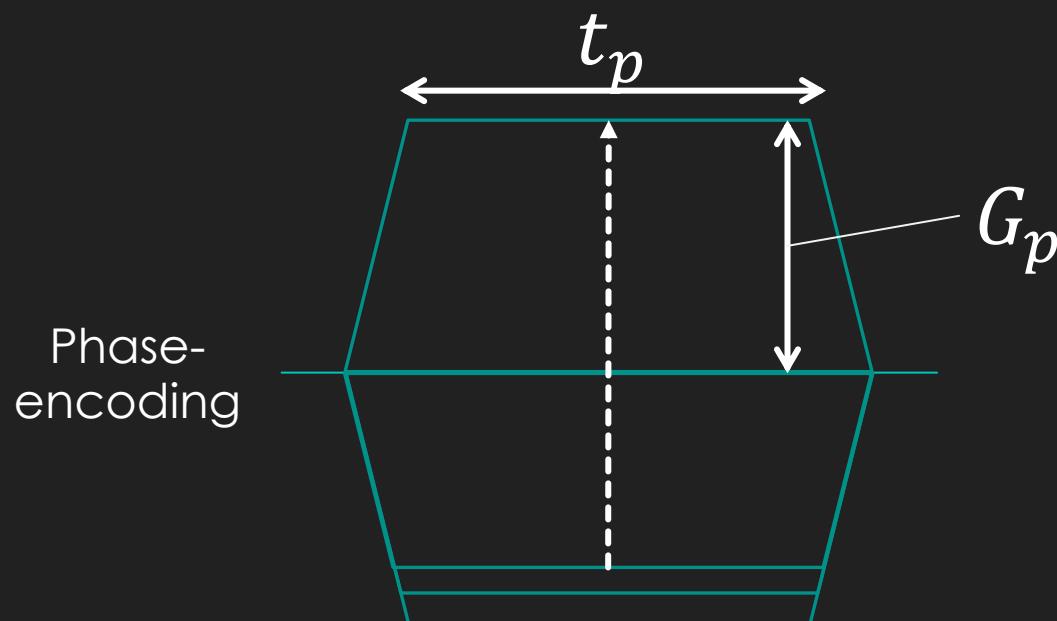
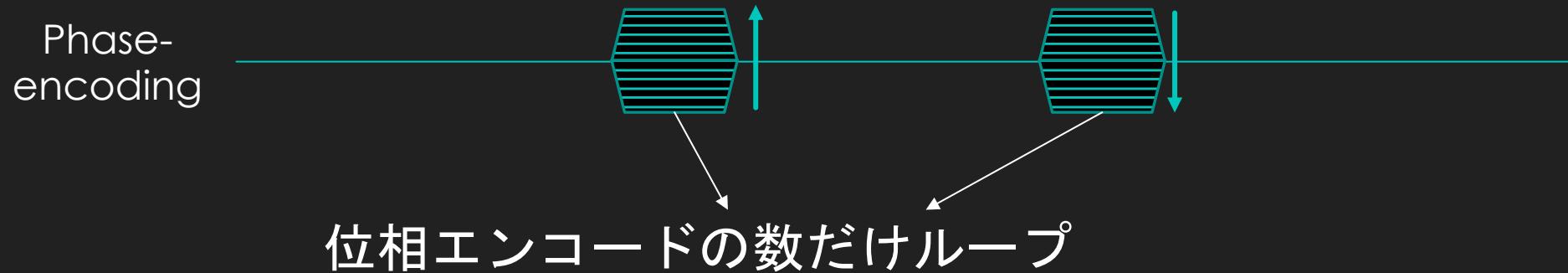


位相エンコード

ソースコードは次のURLで公開しています：
https://github.com/dtamadauw/BlochSolverCode_JSMRM2021



位相エンコード：FOVとの関係



最大磁場強度 [mT/m]

パルス印加時間

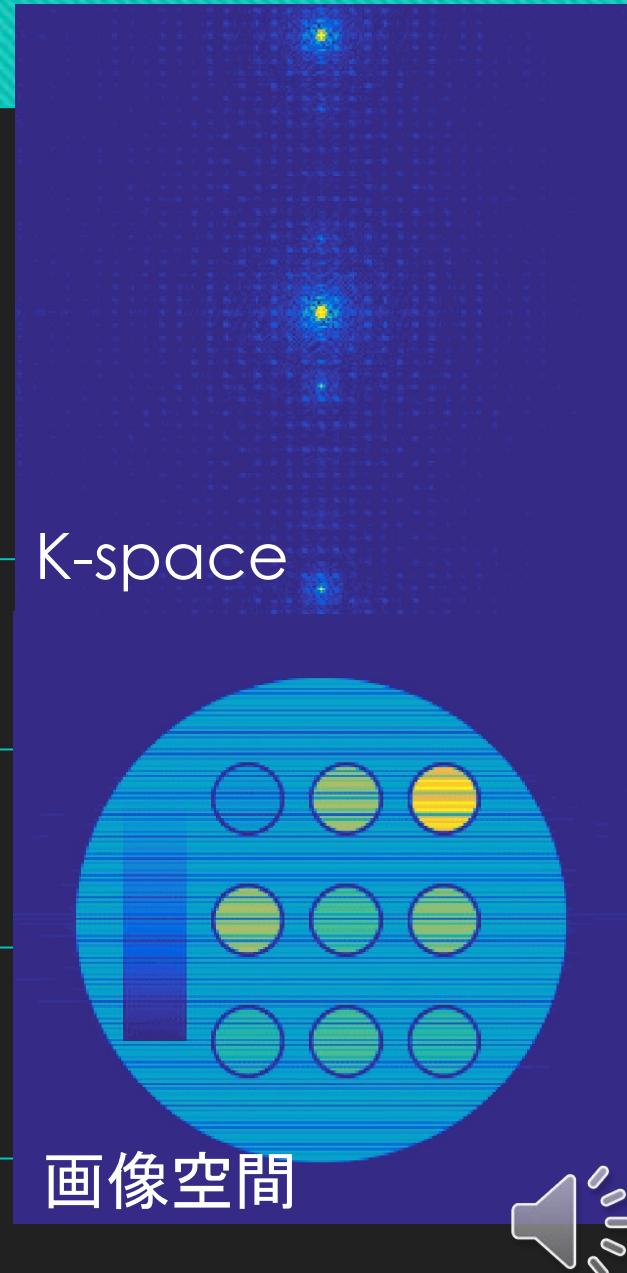
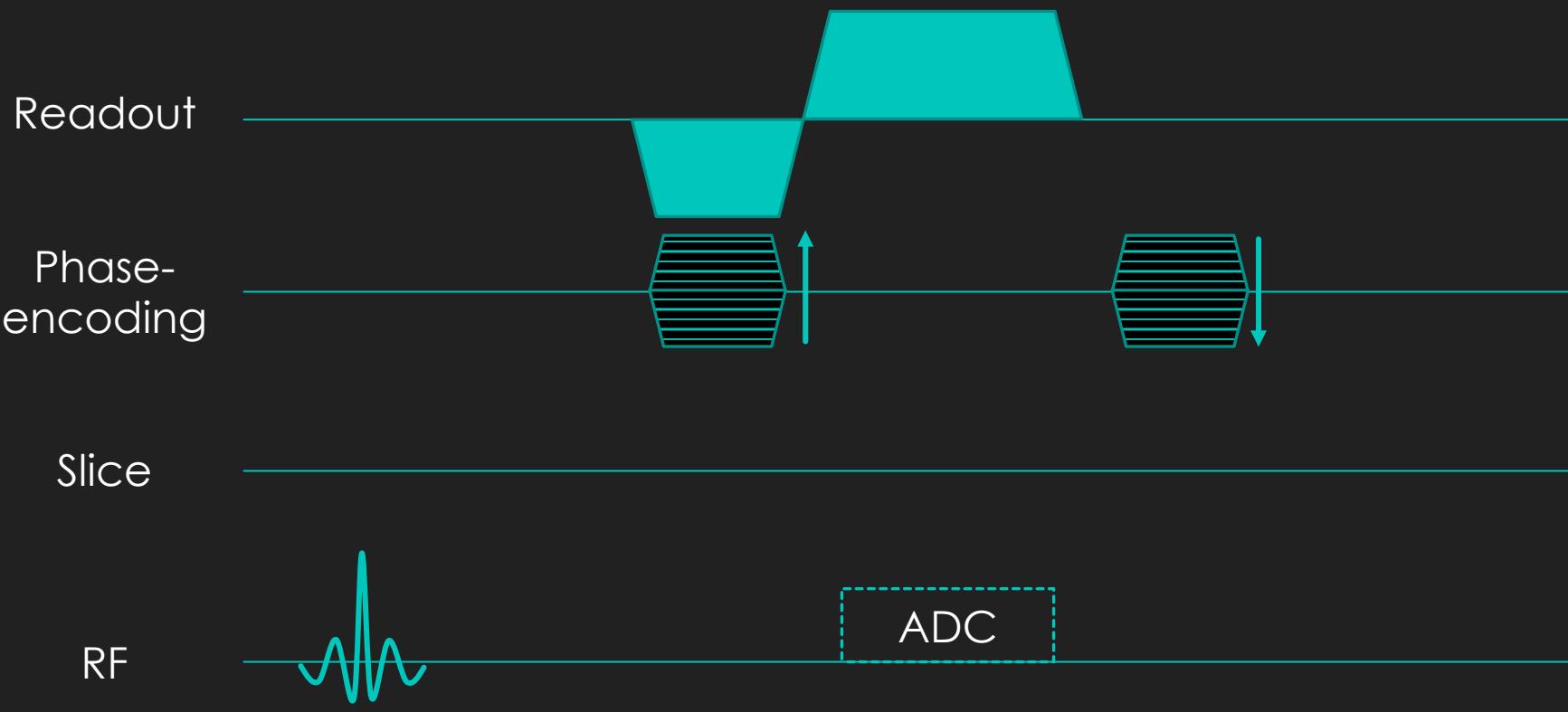
位相エンコード数

磁気回転比 [MHz/T]

$$G_p t_p = \frac{N_p}{2\gamma FOV}$$

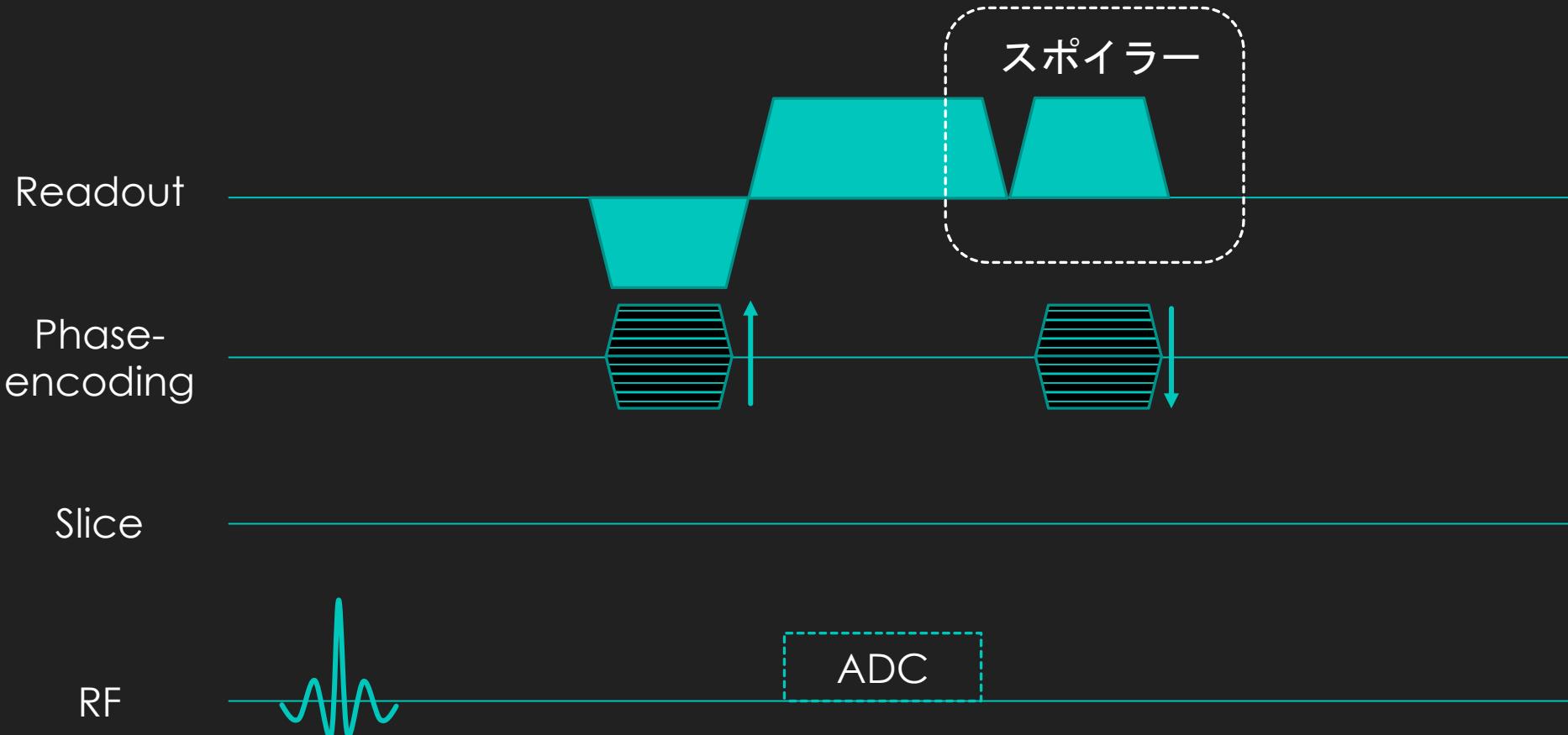


位相エンコード：二次元k-space

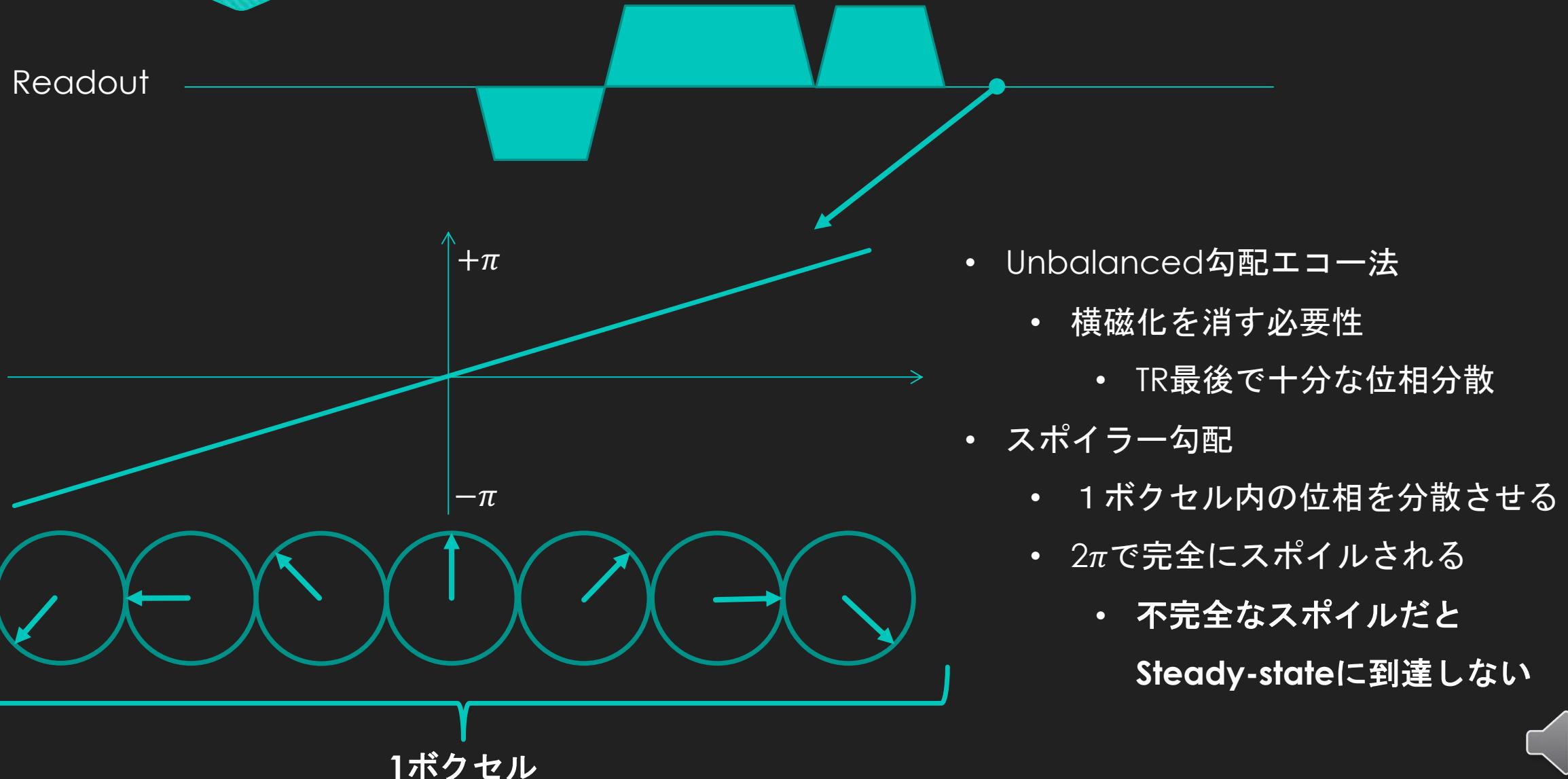


spoiler

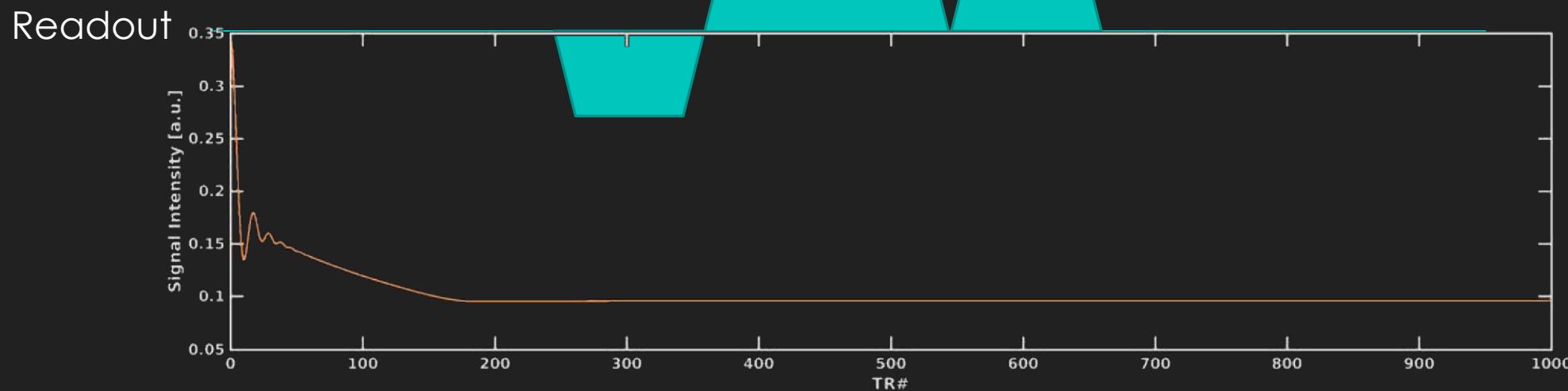
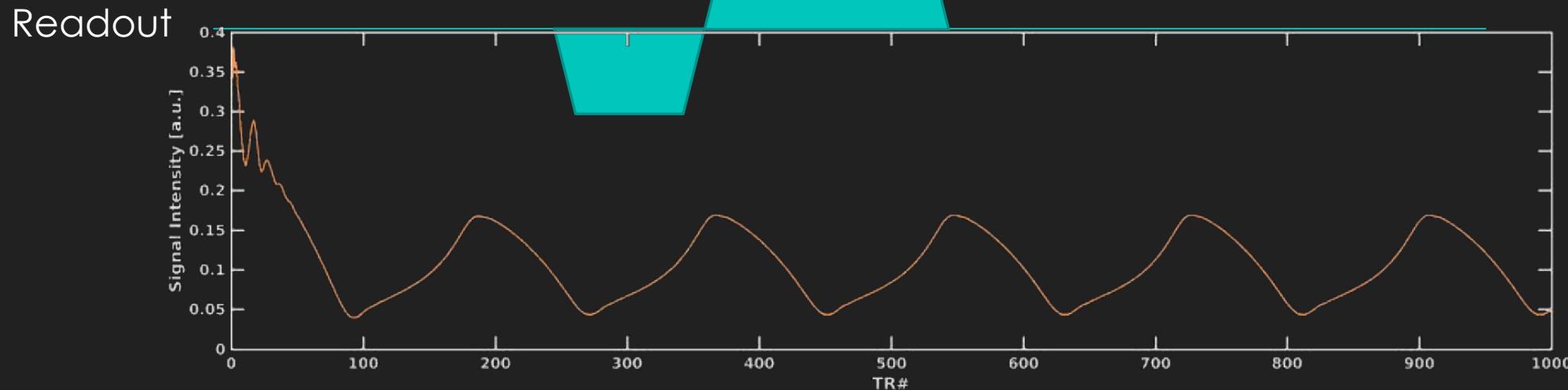
ソースコードは次のURLで公開しています：
https://github.com/dtamadauw/BlochSolverCode_JSMRM2021



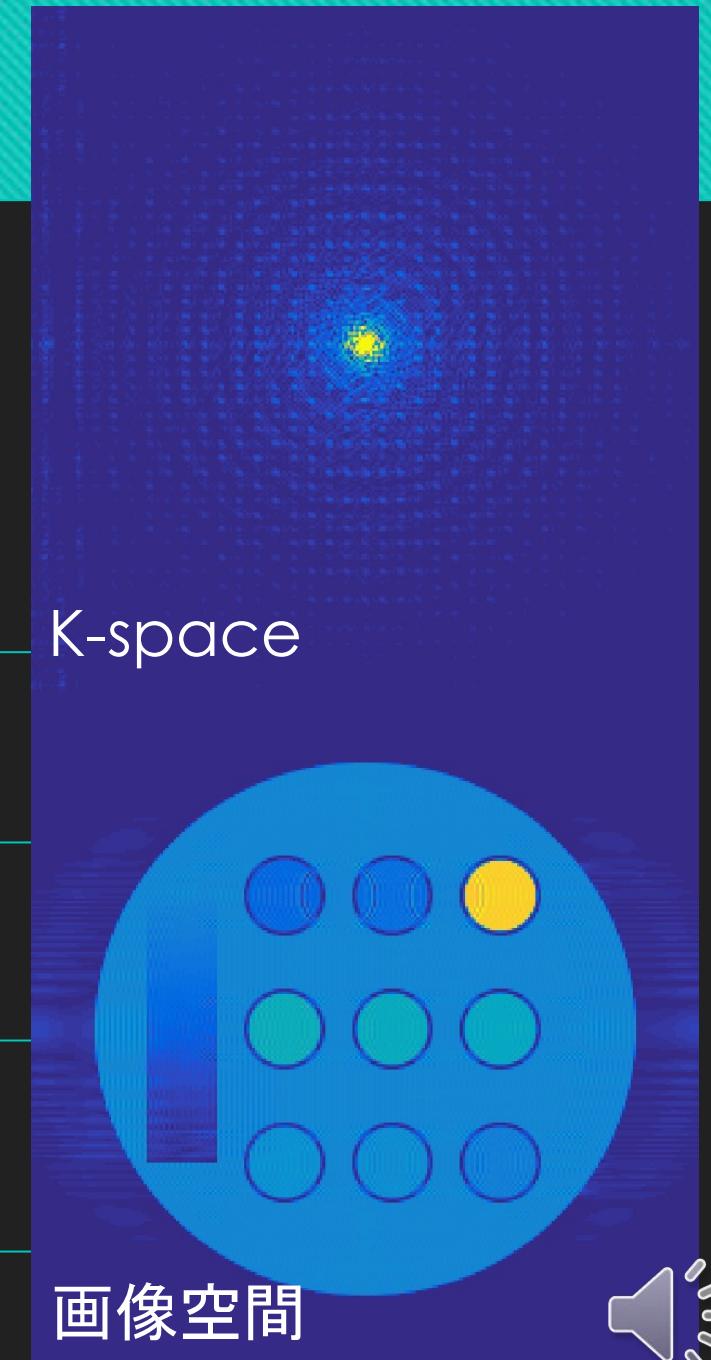
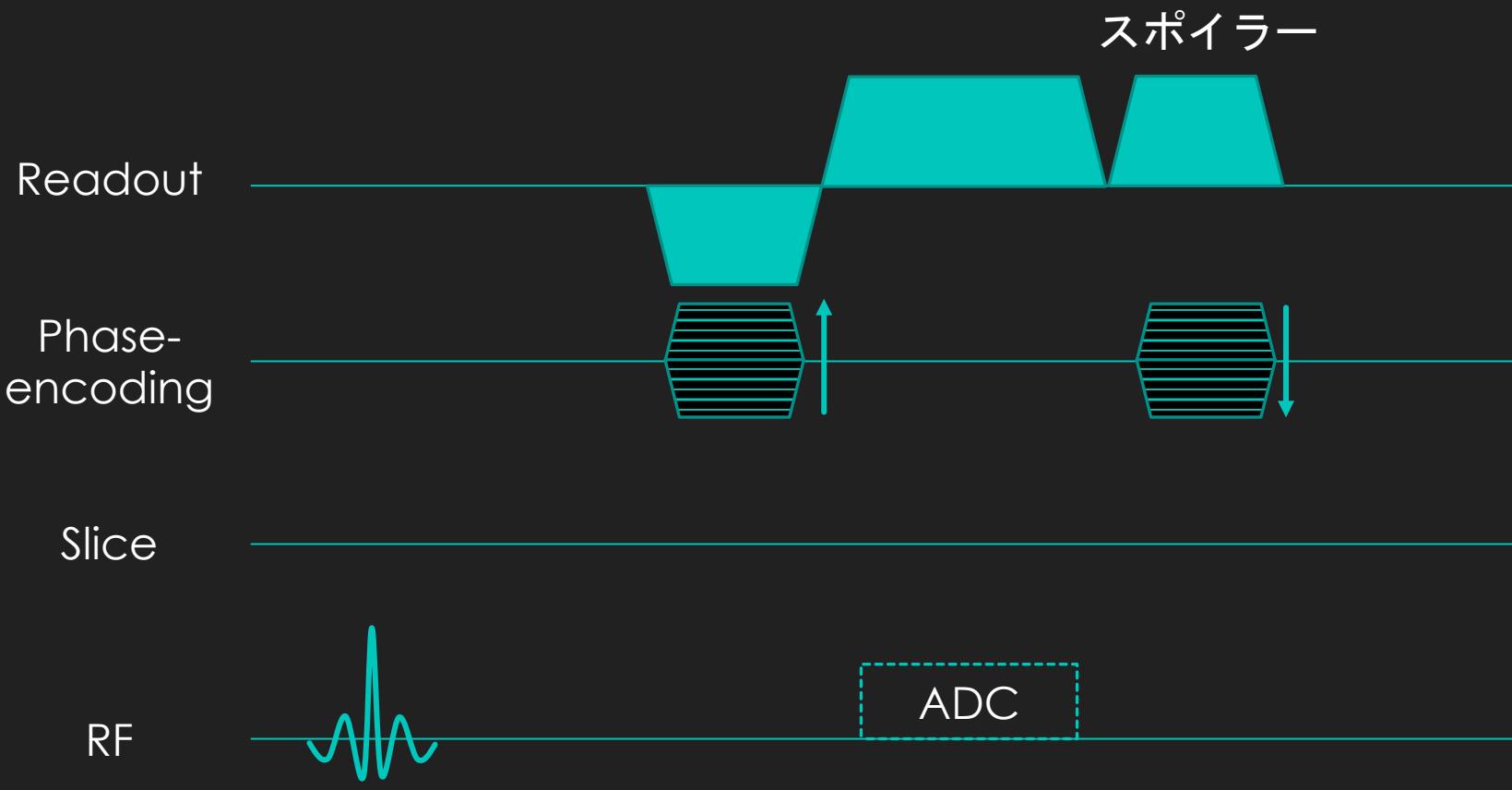
spoiler : モーメント



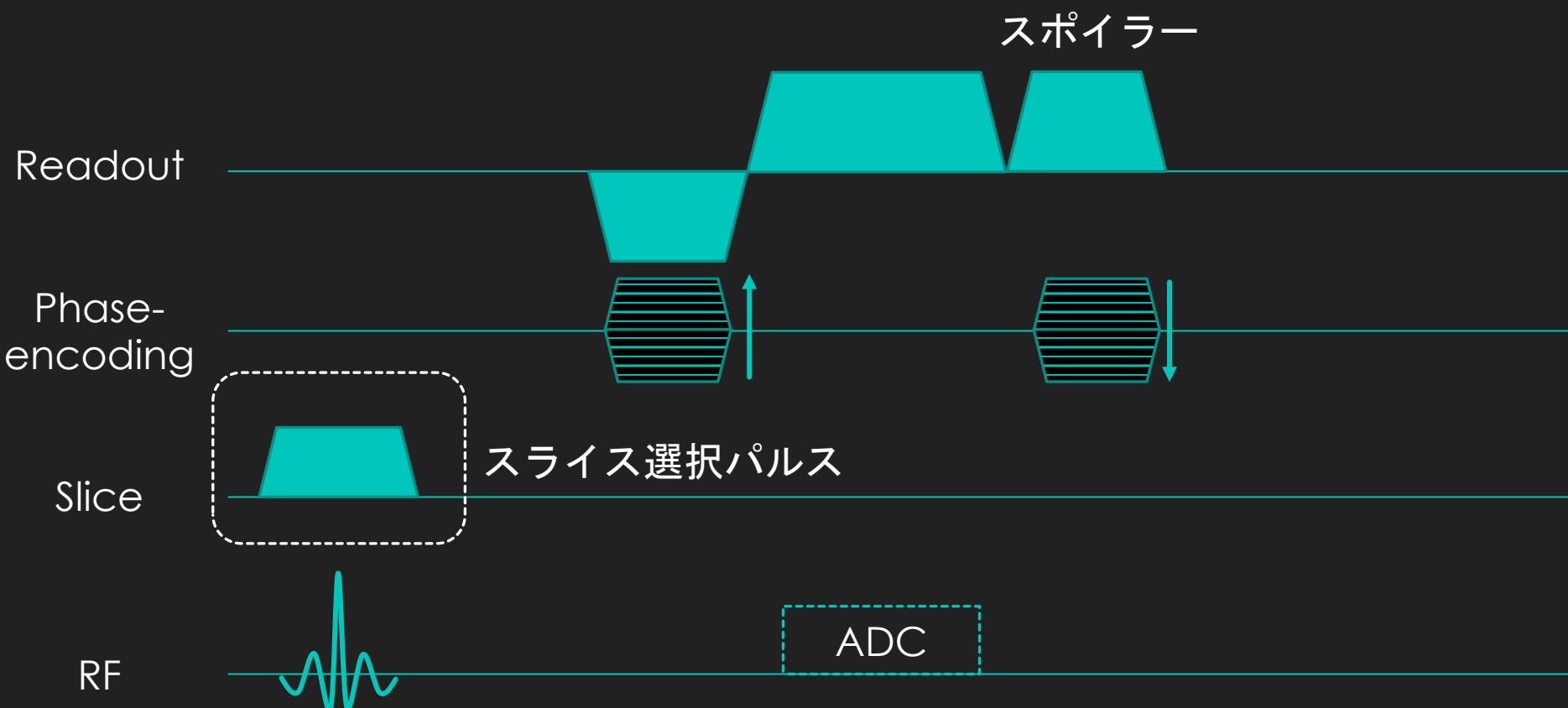
spoiler: Steady-state



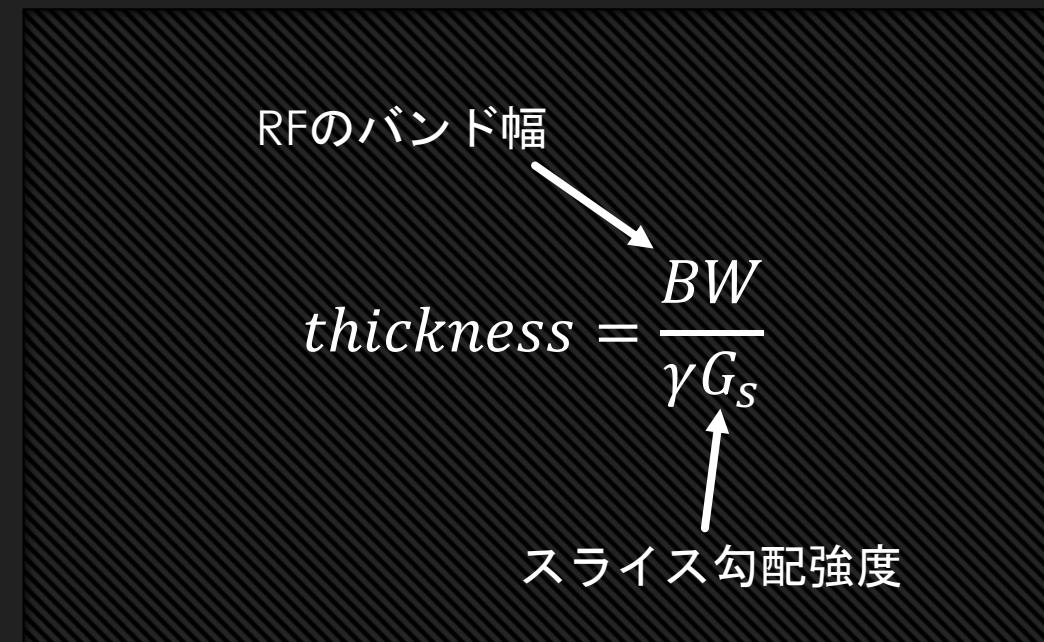
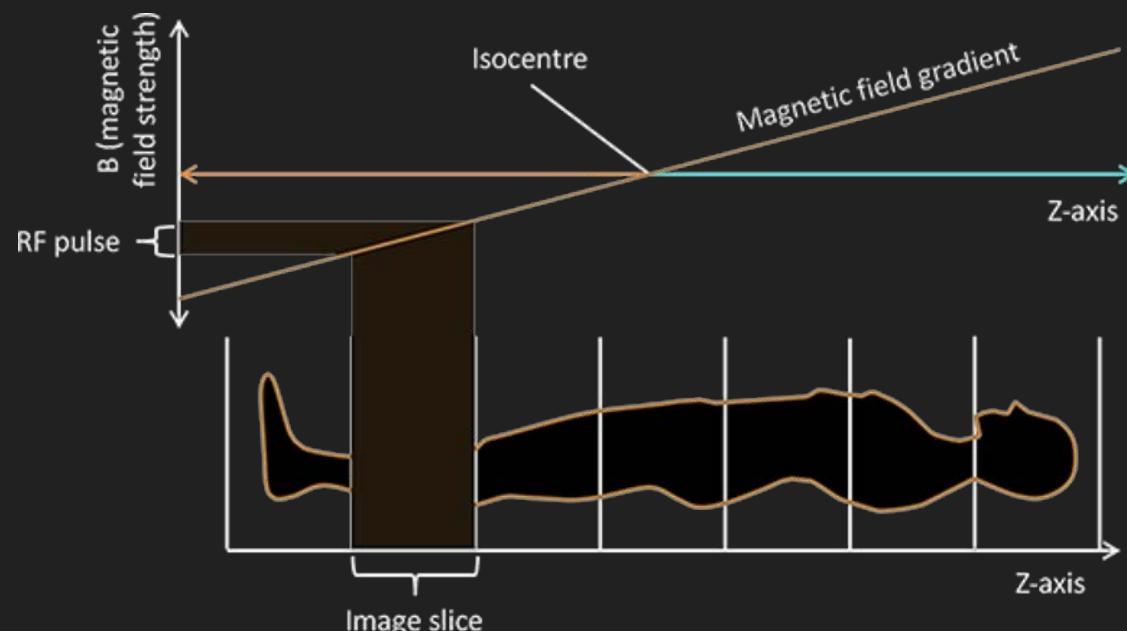
spoiler



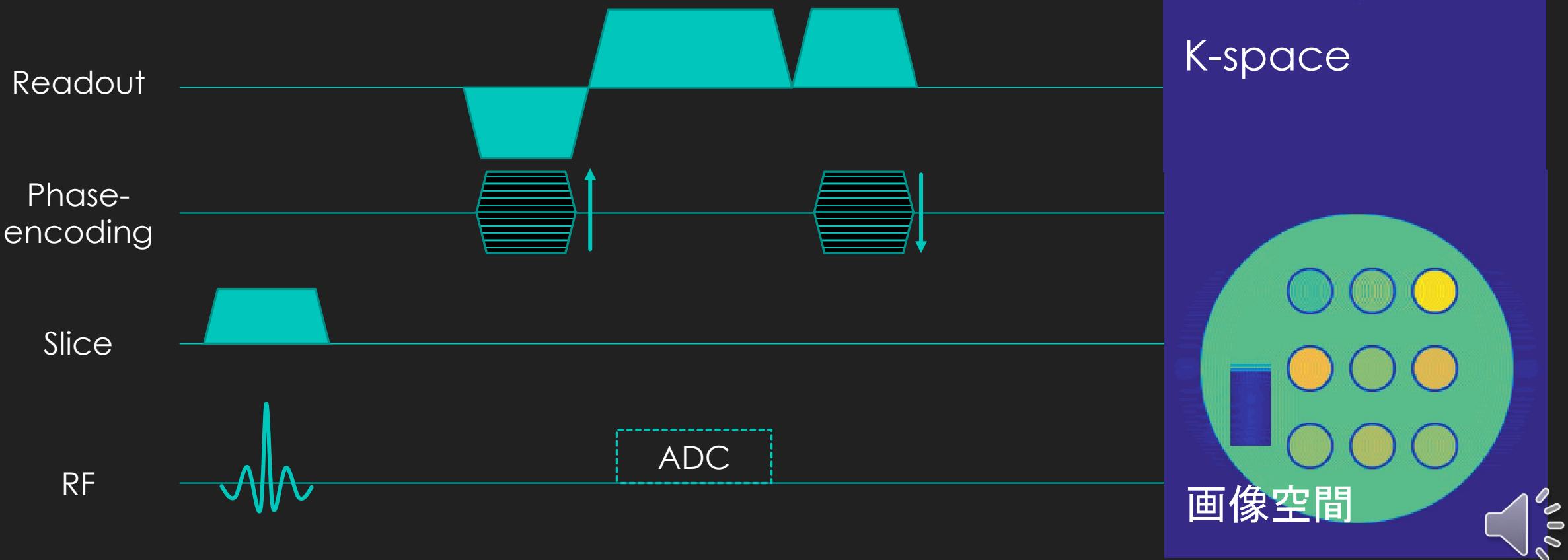
スライス選択勾配磁場パルス



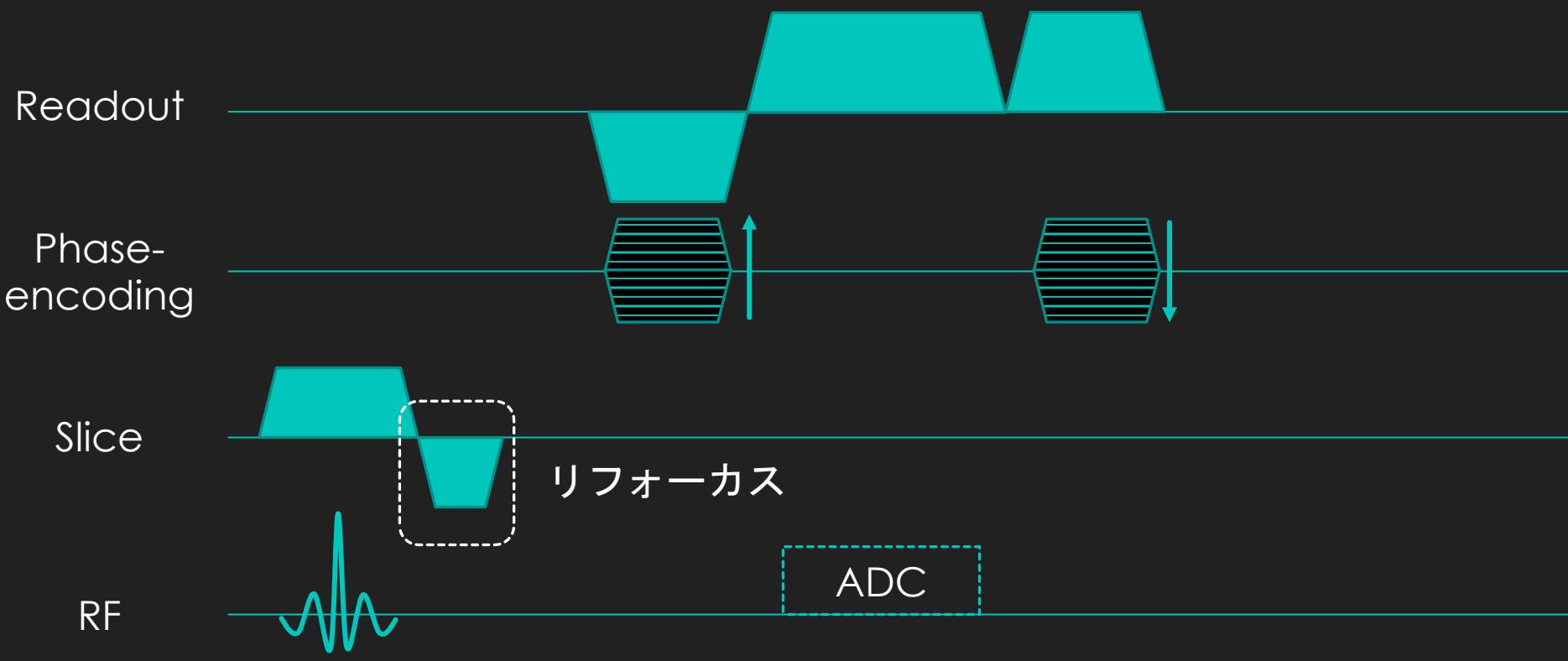
スライス選択勾配磁場パルス：スライス厚



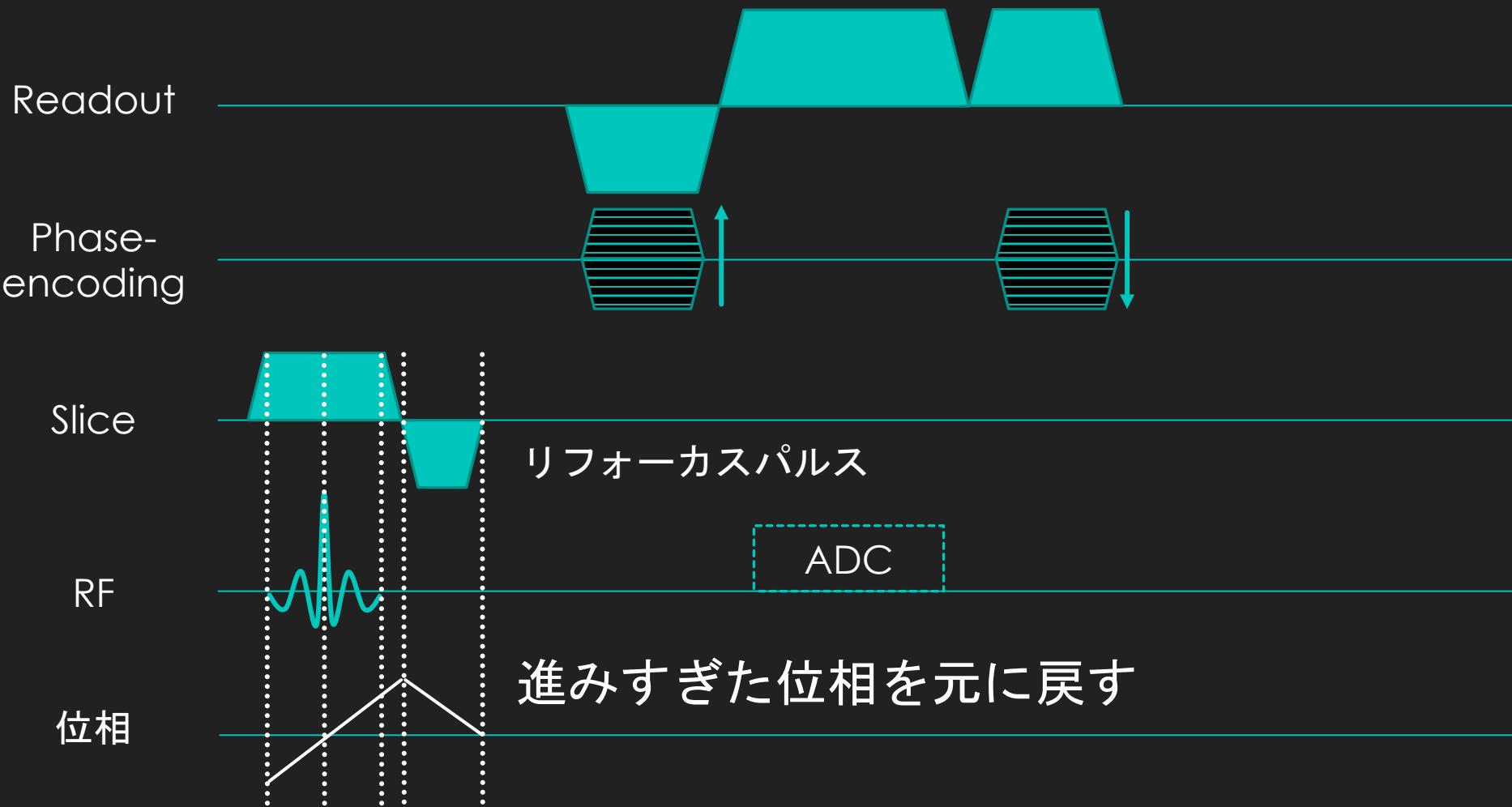
スライス選択勾配磁場パルス



スライス選択勾配磁場パルス+リフォーカス



スライス選択勾配磁場パルス+リフォーカス

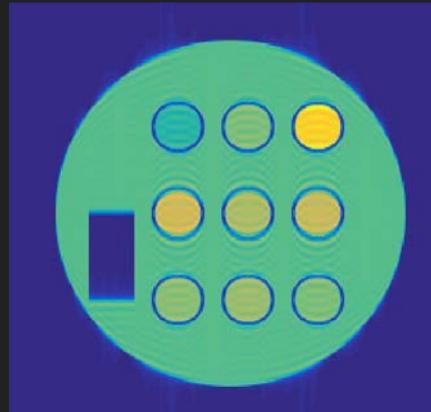


スライス選択勾配磁場パルス+リフォーカス

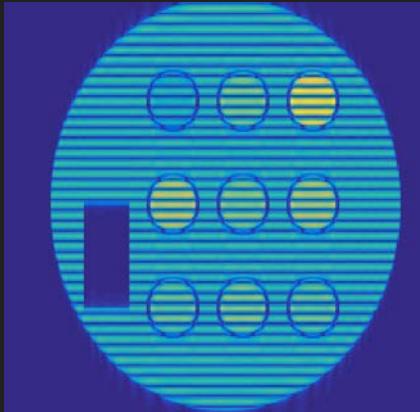


Tips: リードアウトの帯域幅

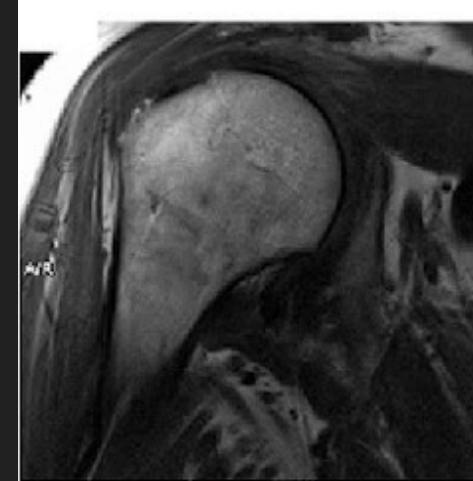
<http://mriquestions.com/chemical-shift-artifact.html>



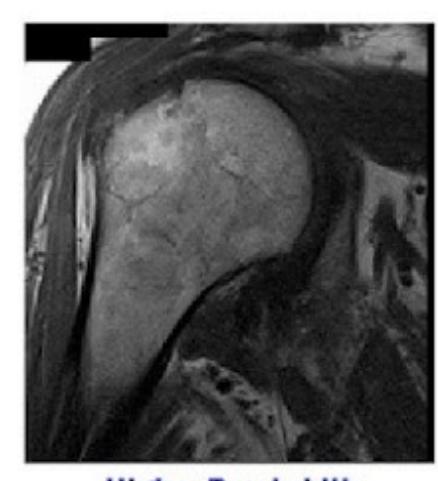
390 Hz/px



97.6 Hz/px

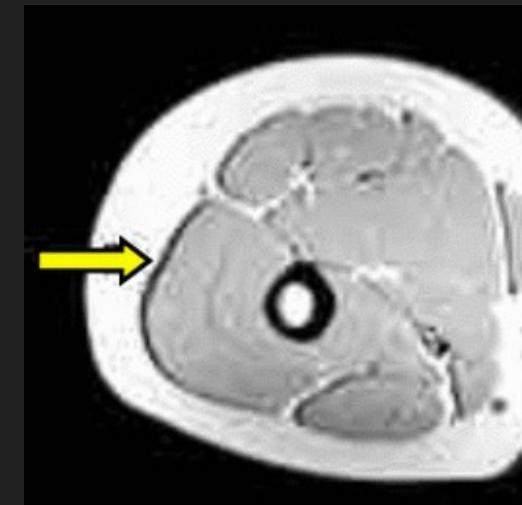


Lower Bandwidth

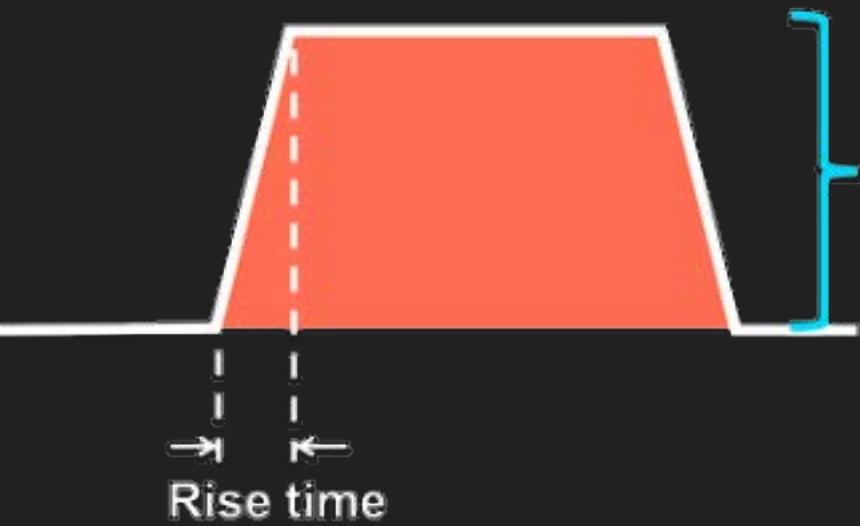


Higher Bandwidth

- リードアウトのBW↑
 - SNR↓ (同じTEなら)
 - TE↓
 - 画像歪み↓
- 脂肪を含む画像では、Chemical Shiftアーチファクトが発生

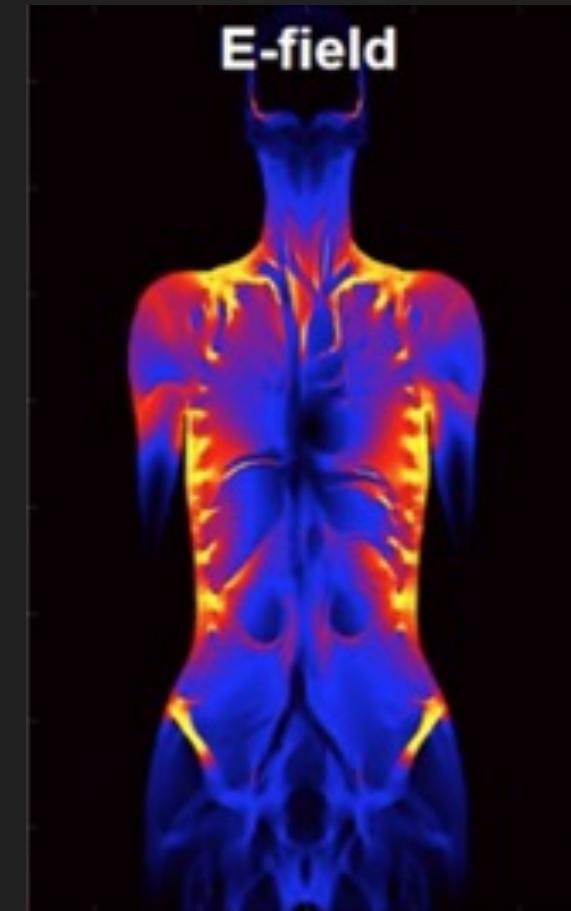
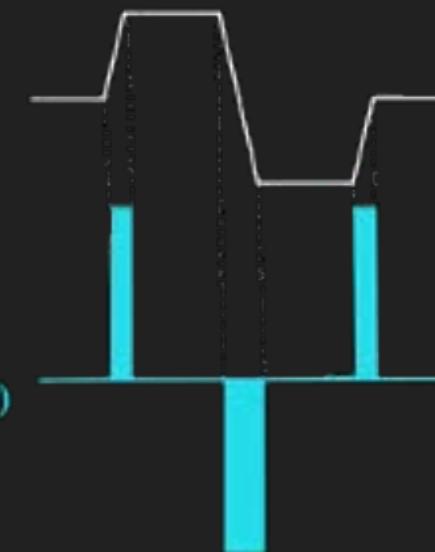


Tips: リードアウトのスルーレート



Gradient (B)

Gradient rate
of change (dB/dt)



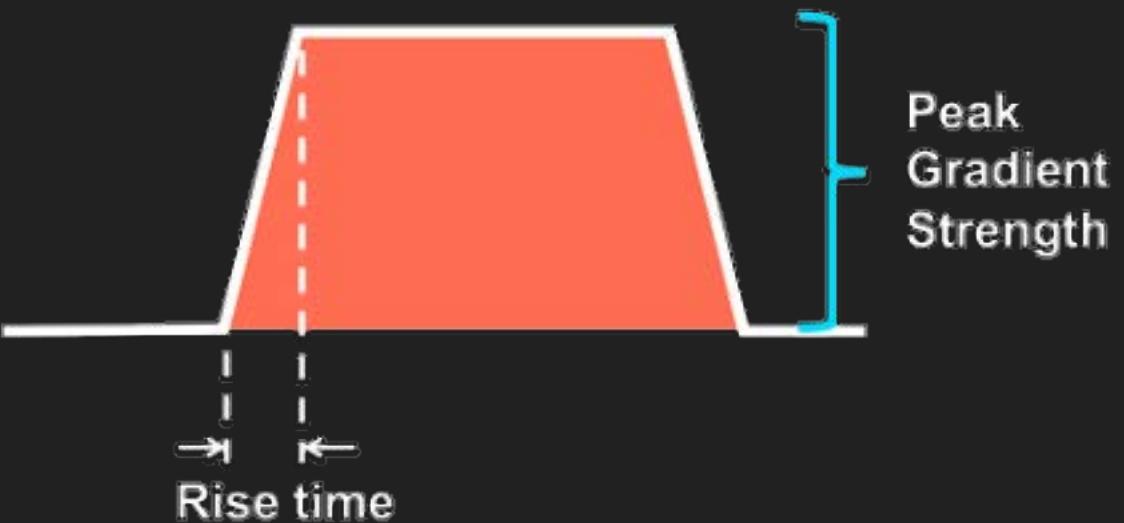
- 強い勾配を短時間で得る場合、高いスルーレートが必要
 - PNSによる制限が存在
 - ただし、ほとんどのケースで問題にならない

<http://mriquestions.com/gradient-specifications.html>

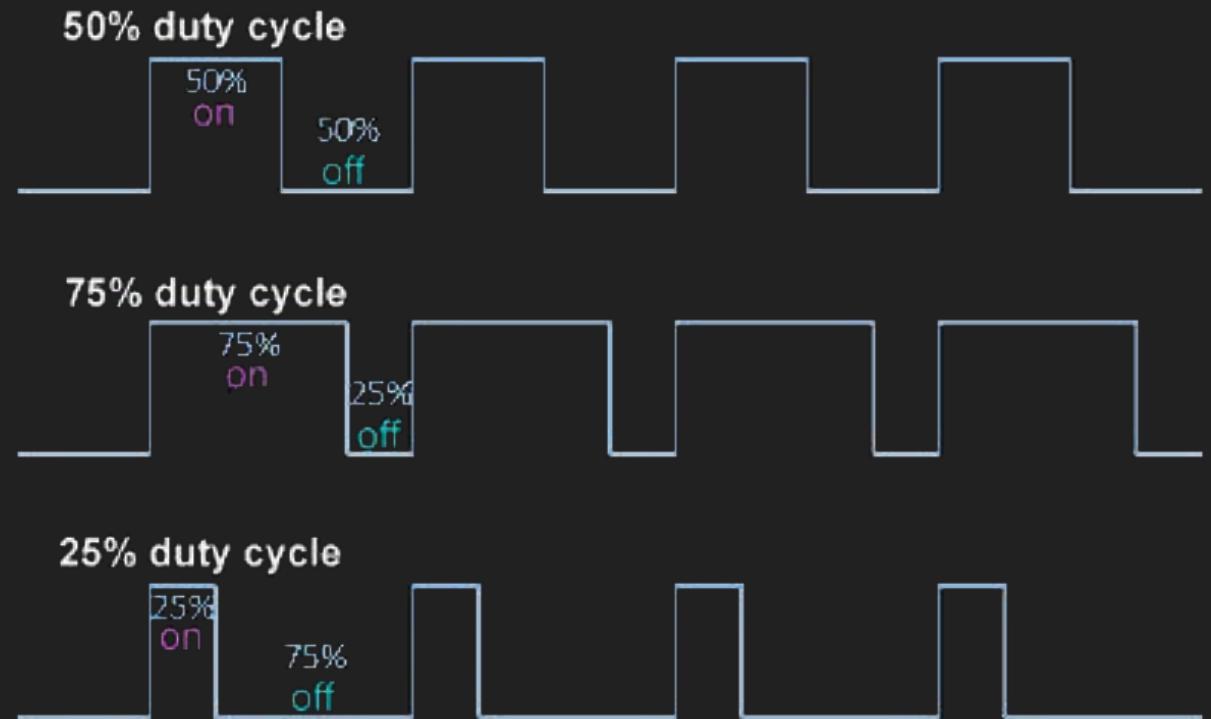
https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation



Tips: リードアウトのDuty



- Duty比↑
 - Gコイルの発熱↑
 - TR↑ (Duty比を下げるため)
- 実際の設計では、PNSよりもDutyによる制限に遭遇する可能性の方が高い



<http://mriquestions.com/gradient-specifications.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation

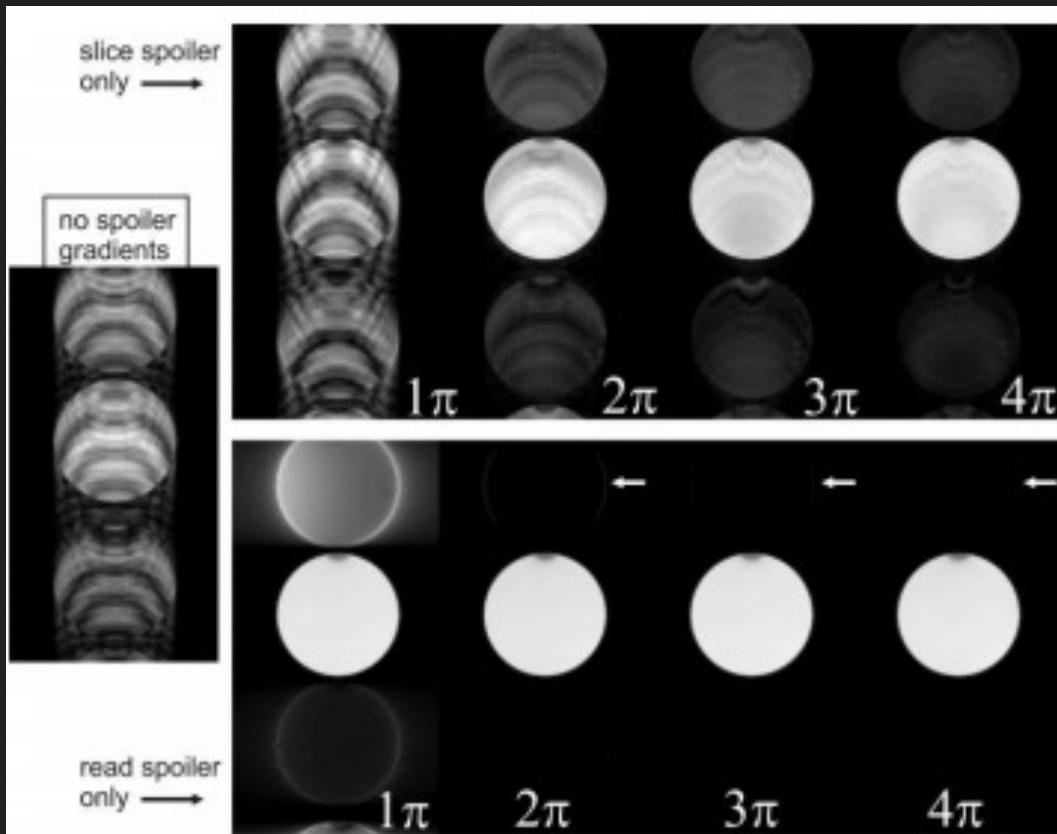


Tips: スポイラー勾配とアーチファクト

Magnetic Resonance in Medicine 60:119–127 (2008)

Moment and Direction of the Spoiler Gradient for Effective Artifact Suppression in RF-Spoiled Gradient Echo Imaging

Jochen Leupold,^{1,*} Jürgen Hennig,¹ and Klaus Scheffler²



- スポイラーの調整がアーチファクト抑制に重要
 - 理論的には、 2π のスパイラーでOK
 - 実際には、それよりも強い値が必要
- スポイラー↑
 - 残留横磁化由来のアーチファクト↓
 - モーションアーチファクト↑ (次のページ)
 - 拡散による信号減衰↑



まとめ

ソースコードは次のURLで公開しています：
https://github.com/dtamadauw/BlochSolverCode_JSMRM2021

- シミュレータ上でのシーケンス実装を通してイメージング勾配を解説した
 - リードアウト
 - スポイラー
 - 位相エンコード
 - スライス選択
- 実際の装置上では、シミュレーションでは考慮されていない多くの要素がある
 - モーション
 - 被験者・患者の動き
 - 装置から伝搬する動き
 - 磁化率効果
 - Diffusion
 - (B1+不均一性)

