

RF パルスの基礎

尾藤 良孝

株式会社日立製作所ヘルスケアビジネスユニット

はじめに

磁気共鳴現象を誘起するためには、ある特定のラジオ波帯周波数（RF : radio frequency）を有する電磁波の照射が必須である。この電磁波を比較的短時間で照射する RF パルスは、MRI で様々な生体情報を観察する際に使用されるシーケンスの基本となっている。例えば、緩和や磁化移動によるコントラスト生成、脂肪や脳脊髄液の信号抑制、RF train による計測高速化、スライス面等の領域選択励起や領域選択抑制、MRA におけるフリップ角の傾斜照射など様々な面で使用されている。現在の MRI においては、これら RF パルスを駆使して、所望の領域から所望のコントラストで信号を計測する技術が搭載され、さらに詳細な生体情報を高速に計測する様々な技術の研究開発が続けられている。このような技術を理解するためには、RF パルスの役割について理解することが重要になっている。

本稿では、これら RF パルスの役割について理解するために、RF パルスの基礎について解説する。理解を容易にするために、RF パルスの波形と周波数特性関数の Fourier 変換で表現される単純化された関係性と、Bloch 方程式により表現される磁化の挙動の二つの観点から説明する。厳密な説明は成書を参照して頂くこととし^{1)~3)}、本稿では概念を把握することに主眼を置くこととする。

RF パルス照射と磁化

静磁場中の核スピンは静磁場方向に僅かに配向し、磁気共鳴周波数をもつ電磁波の照射によって励起され、磁気共鳴信号を発生する。核スピンの集合で表される巨視的磁化の挙動は、次の Bloch 方程式で記述されることが知られている：

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B} + \frac{1}{T_1} (M_0 - M_z) \hat{z} - \frac{1}{T_2} \vec{M}_\perp$$

ここで、 \vec{M} は磁化ベクトル、 γ は磁気回転比、 \vec{B} は電磁波を表す。比較的短時間で照射される RF パルスにおいては、緩和項などは無視しても十分近似ができるが、特に照射周波数と磁気共鳴周波数とに差がある場合には、磁化は周波数差と照射強度に応じて非線形な挙動を示す。非線形な挙動を正確に把握することは難しいため、本稿では、先ず RF パルスの周波数特性関数を用いた簡便な説明を行う。

RF パルス波形と周波数特性関数との関係： フーリエ変換

Bloch 方程式で表される磁化の非線形な挙動は直感的に把握しにくいいため、RF パルスの周波数特性を用いた簡易的な説明の方が理解しやすい場合がある。RF パルスの周波数特性はフーリエ変換によって計算され、RF パルスのフリップ角が小さいとき、特に 90 度程度まではある程度の精度で磁化の挙動を近似可能である⁴⁾。典型的な例としては、sinc 関数の周波数

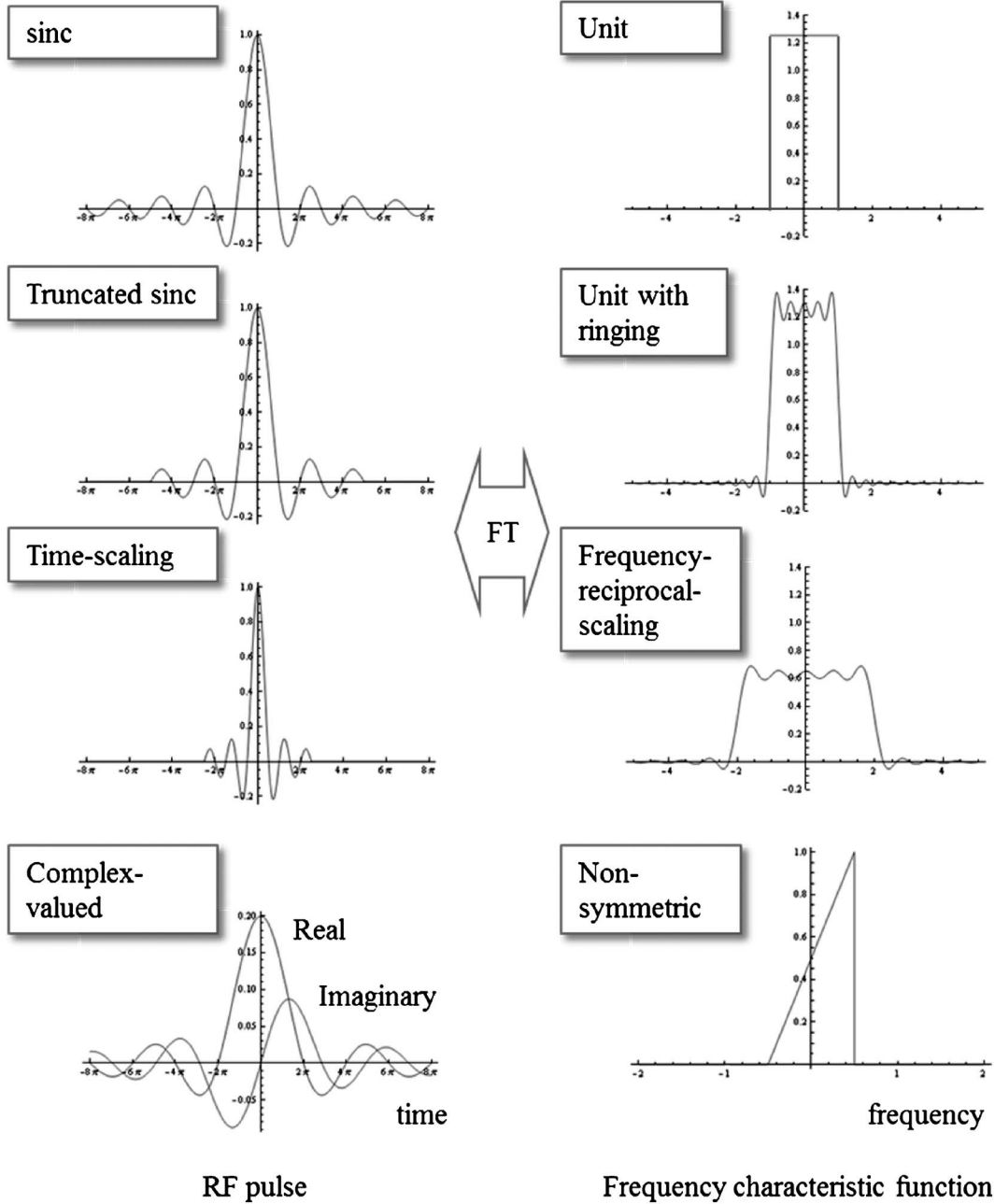


Fig. 1. Typical examples of RF pulses and its frequency characteristic functions. The relationship between the RF pulse and the frequency characteristic function is represented by Fourier transform (FT).

特性関数は有限帯域の単関数、有限時間で打ち切った sinc パルスの周波数特性関数は単関数にリングングが生じた関数、ガウス関数の周波

数特性関数はガウス関数となる (Fig. 1)。フーリエ変換の性質から、RF パルスの印加時間を短縮すれば、その短縮率の逆数で周波数帯域が

拡大する。また、MR Angiography (MRA) で用いられる傾斜プロファイルをもつ周波数特性関数を得るには、実数項だけでなく虚数項ももつ RF パルスが必要となる。重要なフーリエ変換の性質について、Table にまとめる。

特に重要な性質として、RF パルスの乗算が、周波数特性関数では畳み込み積分に変換される点がある。例えば、二つの帯域を励起するような周波数特性関数は単関数と二つの Dirac 関数の畳み込み積分で表され、これに対応する RF パルスは sinc 関数とコサイン関数の積で表される関数となる (Fig. 2)。また、例えば、有限時間の sinc パルスで生じるリングングを抑制するために、ガウス関数やハニング関数を乗算した RF パルスを使用する場合があるが、その周波数特性関数は当該ガウス関数やハニング関数の周波数特性関数を畳み込み積分したものとなる。このような関係性を理解しておくことで、RF パルスのおおまかな性質を把握する

Table. Major properties of Fourier transform

Linearity	$F[af(t) + bg(t)](\sigma) = aF[f(t)](\sigma) + bF[g(t)](\sigma)$
Scaling in domain	$F[f(bt)](\sigma) = (1/b)F[f(t)](\sigma/b)$
Multiplication ↔ convolution	$F[f(t)g(t)](\sigma) = F[f(t)] \otimes F[g(t)](\sigma)$
Power integral	$\int f(t) ^2 dt = A \int F[f(t)](\sigma) ^2 d\sigma$
Integral ↔ value at zero	$\int f(t) dt = F[f(t)](0),$ $f(0) = \int F[f(t)](\sigma) d\sigma$
Symmetric pulse ↔ real-valued function	$f(t) = f(-t) \rightarrow \text{Im}\{F[f(t)]\} = 0$

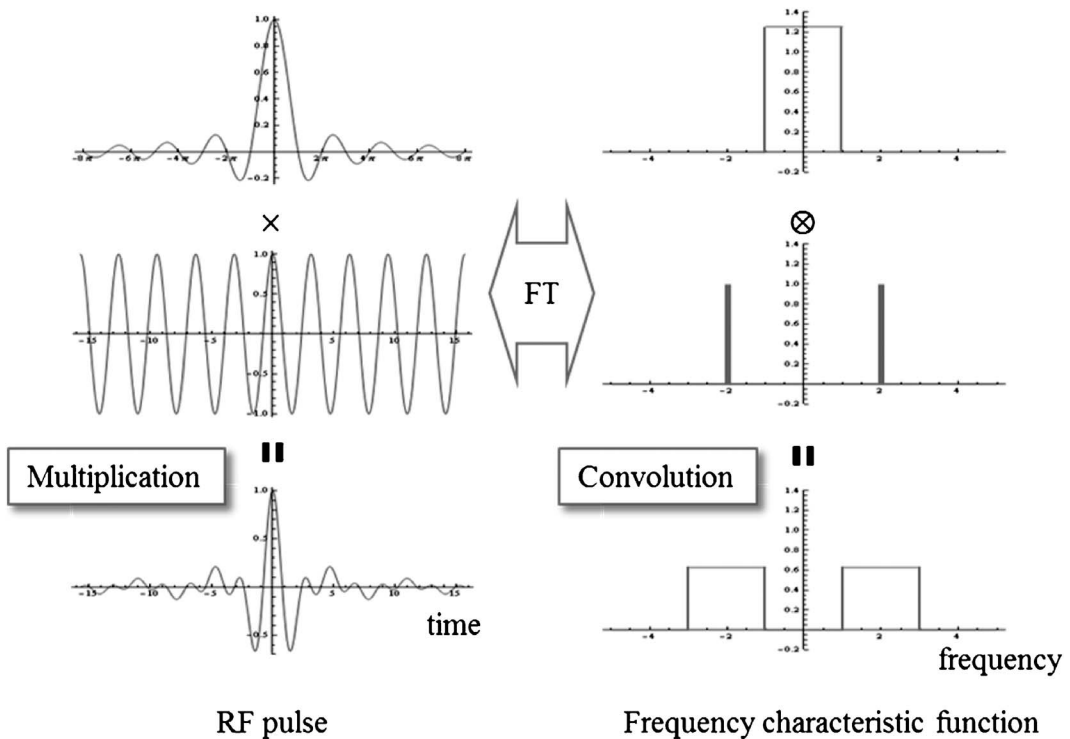


Fig. 2. Typical FT Relationships between RF pulses and frequency characteristic functions in producing a dual-band frequency characteristic function. FT transforms multiplication of sinc pulse and cosinusoidal pulse in time-domain into convolution of unit function and two Dirac functions in frequency domain.

ことが容易となる。

周波数選択励起・抑制とスライス選択 励起・抑制

RF パルスのおおまかな性質を把握する例として、選択励起・抑制について説明する。単関数で与えられる周波数特性関数は周波数選択的な励起や抑制、スライス選択励起や抑制に使用される。スライス選択においてはスライス断面と直交する方向に傾斜磁場を印加しながら、RF パルスを照射することで、周波数選択を空間選択へ変換している。水と脂肪のように磁気共鳴周波数にケミカルシフトがある場合、スライスの位置ずれが生じる (Fig. 3)。この位置ずれは、傾斜磁場強度が弱いほど、RF パルス印加時間が長く周波数特性関数の帯域が狭いほど大きくなる。空間的な信号抑制を行う場合など注意が必要になる場合がある。周波数選択的

なパルスとしてはこの例以外にも、二項式 RF パルスなど複合パルスが用いられている。これもフーリエ変換の関係で周波数特性関数を求めることでその性質を確認可能である。

Bloch 方程式による RF パルスと磁化の 挙動解析

今までの説明では、RF パルスをフーリエ変換して得られる周波数特性関数を用いて、RF パルスの性質を説明してきた。しかしながら、周波数特性による簡易的な説明では実際の磁化の挙動と乖離してしまう場合がある。これは RF パルスを照射したときの磁化の挙動の非線形性を、周波数特性では無視しているためである。磁化の挙動をより正確に求めるには、Bloch 方程式を用いた議論が必要となる。Bloch 方程式で記述される磁化の挙動は、回転座標系において実効磁場ベクトルを回転軸とす

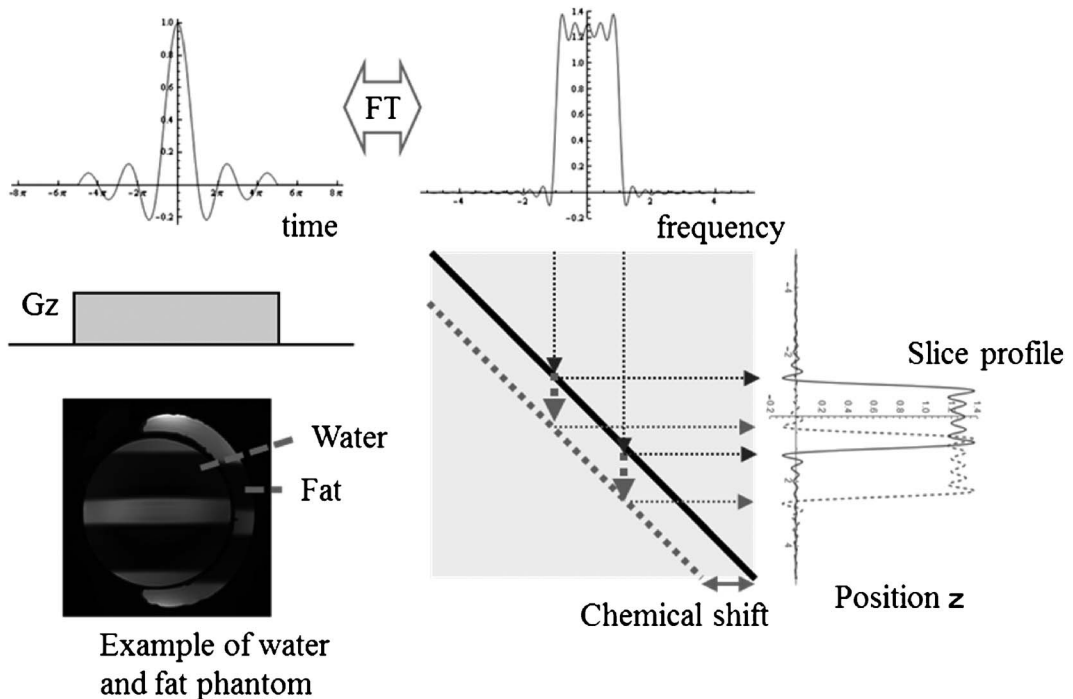
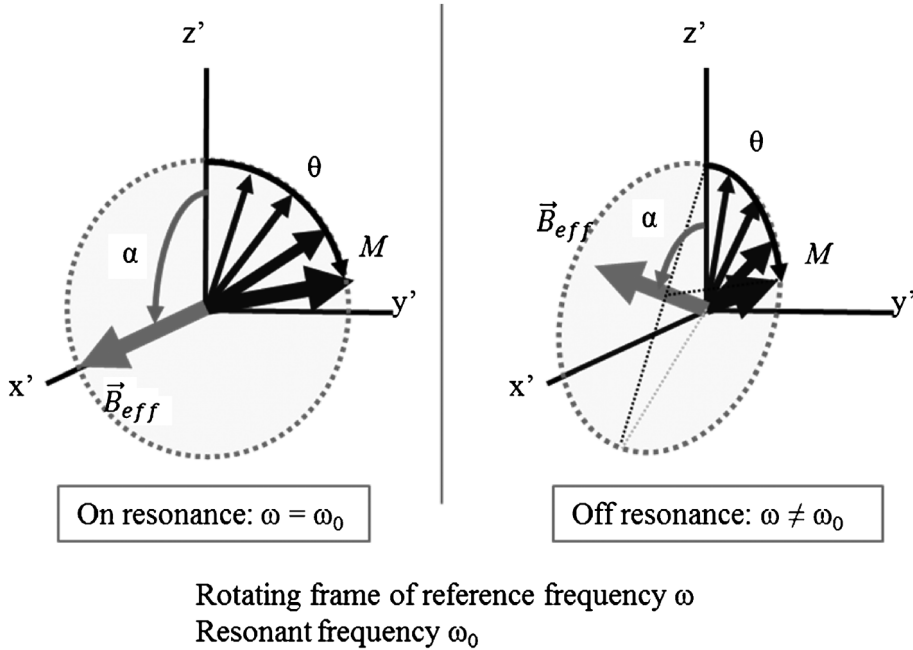


Fig. 3. Mechanism of chemical shift displacement (CSD). Chemical shift produces displacement of slice position. Left image shows CSD of water and fat along the z-direction. Right graph shows how CSD is produced by the chemical shift and slice gradient. The diagonal line is the strength of gradient magnetic field. The displacement is proportional to the chemical shift and reciprocal to the strength of the slice gradient.



$$\vec{B}_{eff} = \left(B_0 - \frac{\omega}{\gamma} \right) \hat{z} + B_1 \hat{x}' = \begin{pmatrix} B_1 \cos \varphi \\ B_1 \sin \varphi \\ (\omega_0 - \omega) / \sqrt{(\omega_0 - \omega)^2 + B_1^2} \end{pmatrix}$$

$$\theta = \int B_{eff} dt$$

Fig. 4. Magnetization behavior under excitation of an RF pulse with on-resonance and with off-resonance frequencies.

る回転運動と近似される (Fig. 4). 特に、磁気共鳴周波数と照射周波数が異なるオフレゾナンスの状況では、実効磁場が x' - y' 平面から離れるため、磁化の運動は円錐面状の回転となる。RF パルス印加時間は比較的短時間な場合が多いため、緩和項などは無視しうることが多い。

周波数特性による解析の限界

Bloch 方程式を用いて、平衡状態にある磁化に、矩形パルスを印加した場合と sinc パルスを印加した場合の磁化の挙動を計算した結果を示す (Fig. 5)。RF パルスの周波数と磁気共鳴周波数が等しいオンレゾナンスでは y' 方向に磁化が移動していくが、両者が異なるオフレゾ

ナンスの場合、周波数差に応じて円弧状の軌跡を描いていることが分かる。また、sinc パルスの場合、強度の変化に応じてさらに複雑な軌跡を描くことが分かる。周波数差ごとに求めた軌跡の終点を結ぶことで、RF パルス照射による周波数プロファイルが得られる。フーリエ変換で得られる周波数特性関数と Bloch 方程式による磁化の挙動解析の差を、sinc パルスを例として示す (Fig. 6)。Sinc パルスによる横磁化の周波数プロファイルをフリップ角を変化させて計算した結果、フリップ角が小さいときには、フーリエ変換による周波数特性関数と同様な傾向を示すが、フリップ角が大きくなるに従い、両者の乖離が大きくなる事が分かる。これは磁化の非線形な挙動を考慮に入れているか否かの差が大きくなるためである。

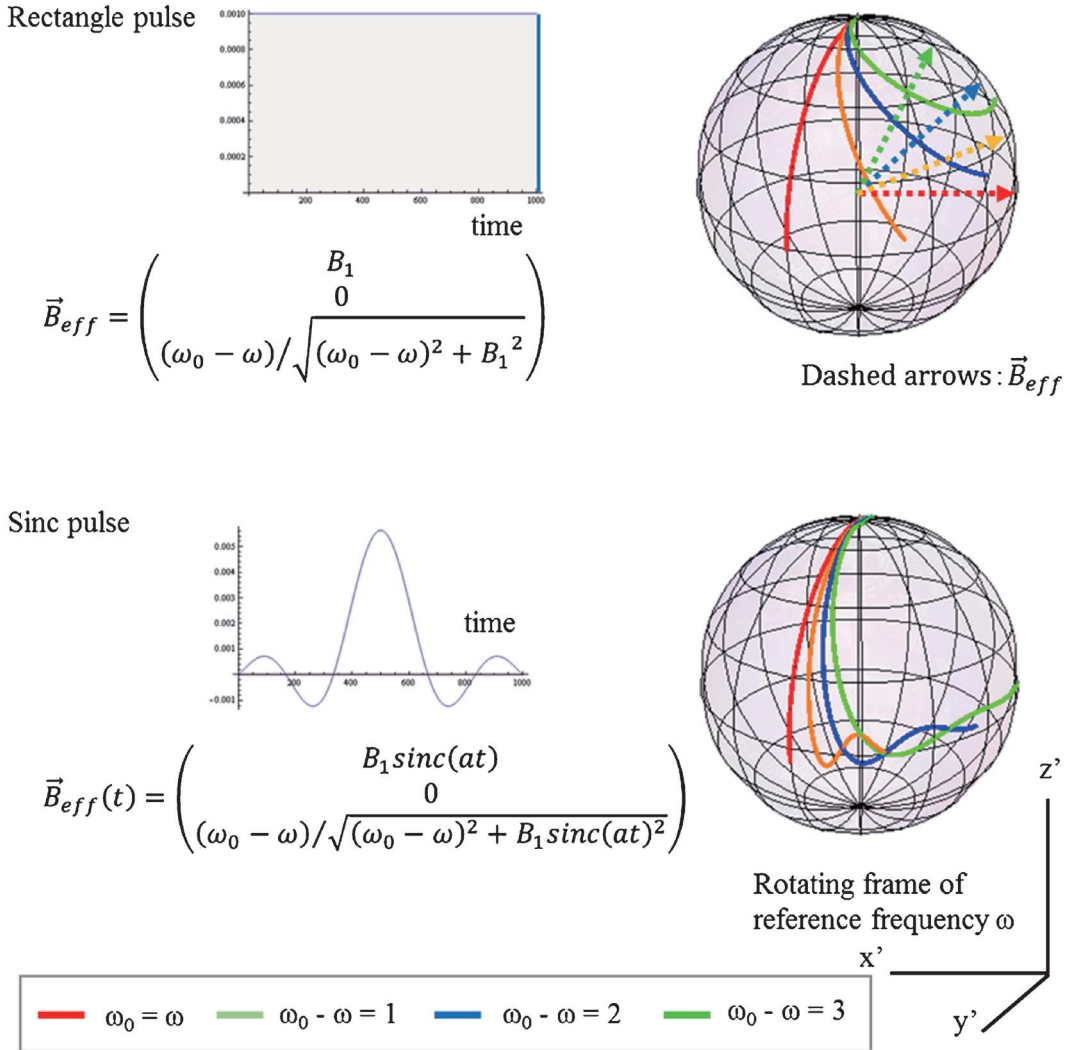


Fig. 5. Magnetization behavior under irradiation of RF pulses with on-resonance and with off-resonance frequencies. Upper figures show the rectangle pulse case and lower figures show the sinc pulse case. Off resonance pulses produce nonlinear relationship to the irradiated amplitude and the frequency differences from the magnetic resonance frequency.

Shinnar-Le Roux (SLR) パルス

所望の励起プロファイルを得るために、Bloch 方程式に基づいた RF パルスの設計方法の一つとして Shinnar と Le Roux が独立に提唱した方法がある⁵⁾。この方法では、磁化が取りうる位置を表す球面を平面へ投影し、その単位円周上で所望のプロファイルを規定する。このプロファイルになるような軌跡を、周波数差による回転と RF パルス印加強度による変換

でステップ関数的に近似することで求めていく方法である (Fig. 7)。ここでは、所望のプロファイルとして、ある周波数帯域でなるべく均一に励起し、帯域外では励起しないような励起パルスを想定している。なお、この提唱方法で得られる RF パルスを SLR パルスと呼ぶ。

Sinc パルスと SLR パルス (励起用)、SLR パルス (反転用) の形状と、その照射強度を変えて得られる横磁化と縦磁化の周波数プロファイルを示す (Fig. 8)。Sinc パルスではリング

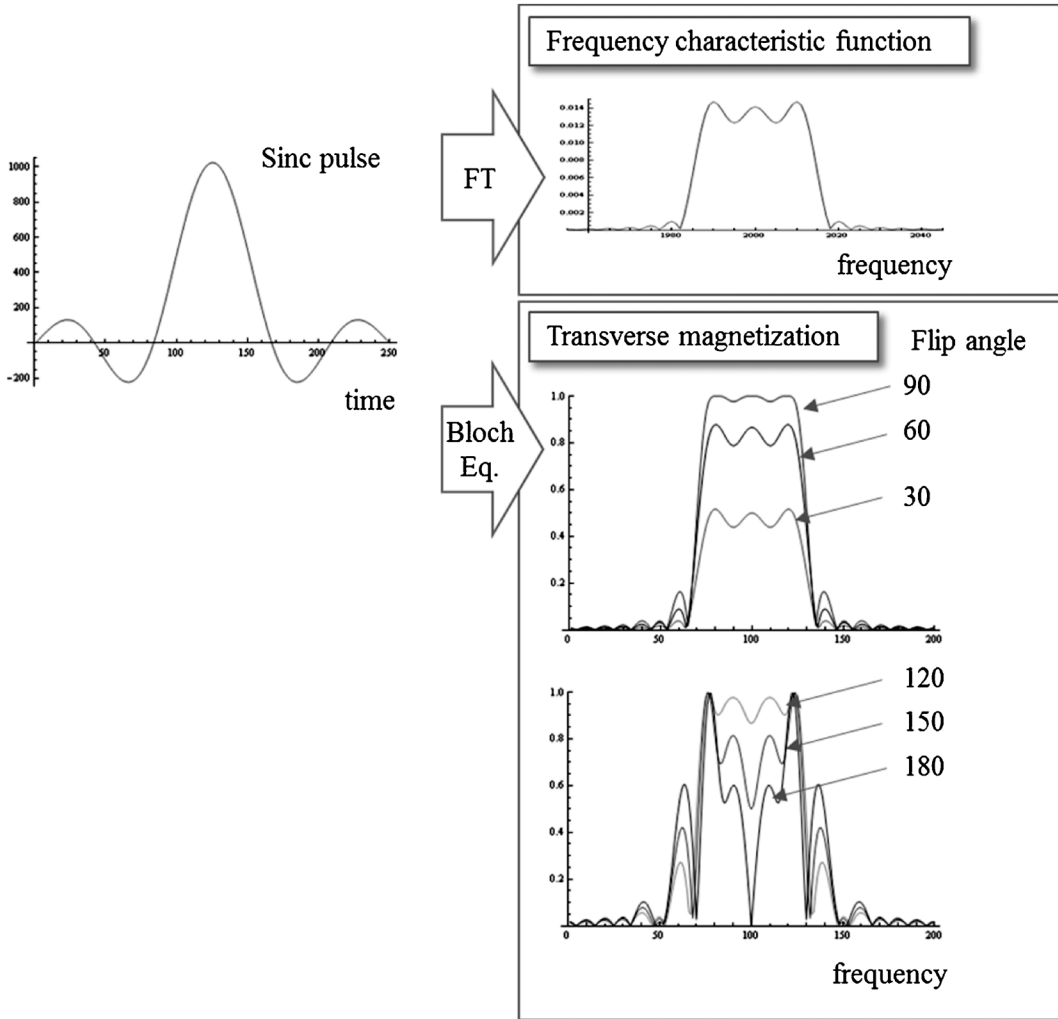


Fig. 6. Difference between the frequency characteristic function and simulated magnetization profiles after irradiation of the sinc pulse with various flip angles. Larger flip angle produces larger difference in magnetization profile from the frequency characteristic function.

ングが目立つ。これに対し、SLRパルス（励起用）ではFA = 90で横磁化と縦磁化が所望のプロファイルとなっており、SLRパルス（反転用）では、FA = 180で縦磁化が所望のプロファイルとなっていることが分かる。

断熱反転パルス

SLRパルス（反転用）のプロファイルを見るとFAの違いによって反転の度合いに差があることが分かる。特に、近年の高磁場化に伴うRFパルスの高周波化は、生体内での実効磁場

の空間的な不均一を引き起こし、結果として反転パルスの空間的な不均一を生じている。断熱反転パルスは、高周波磁場の不均一があっても一様に反転を起こすように設計したRFパルスである⁶⁾。比較的低強度で長時間、また周波数掃引を組み合わせると、実効磁場の方向に磁化を向かせながら、実効磁場を少しずつz軸から-z軸へと移動する (Fig. 9)。これにより、ある周波数帯の磁化を、RF照射強度に依らずに-z軸方向に集めていく性質をもつ。

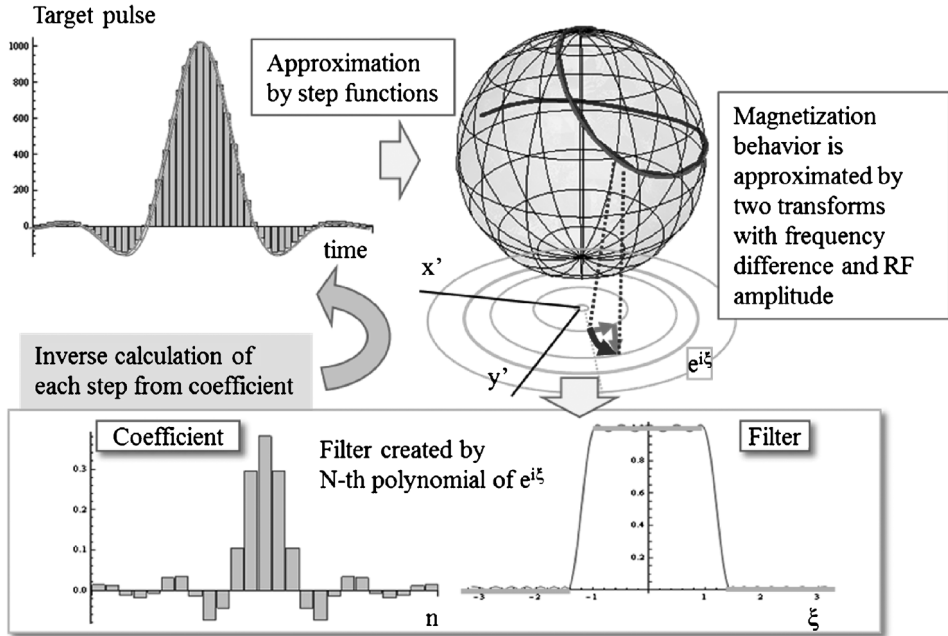


Fig. 7. Schematic diagram of Shinnar-Le Roux (SLR) pulse calculation. Target pulse is calculated by desired digital filter created by polynomials of $e^{i\xi}$.

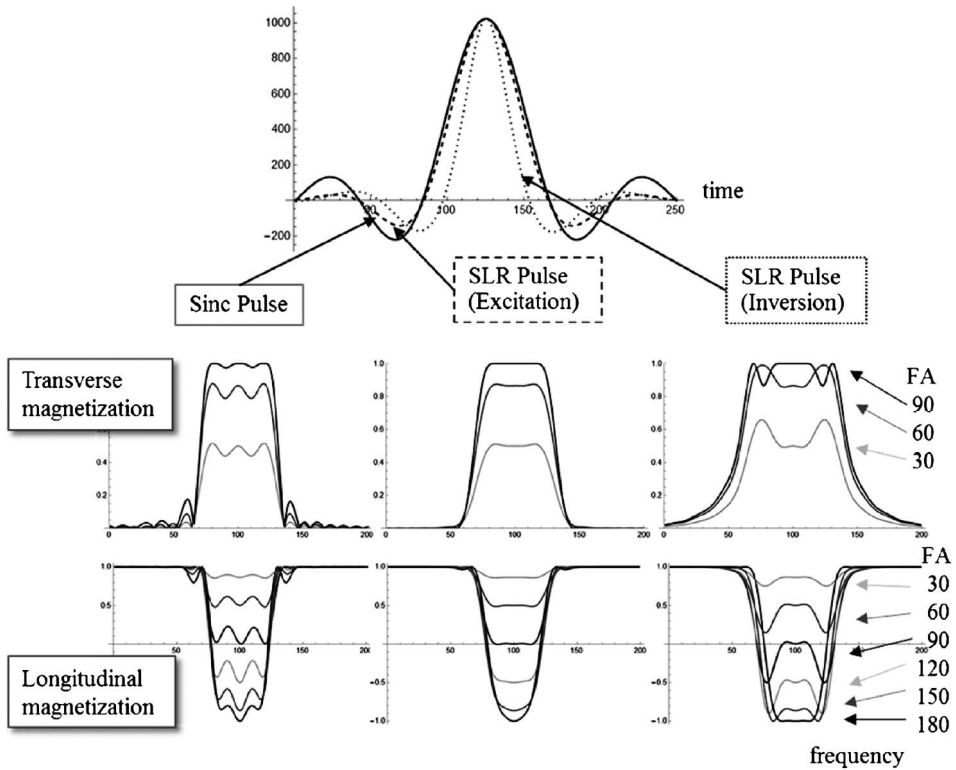
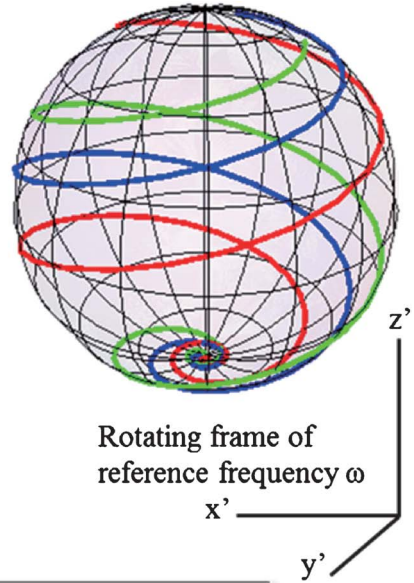
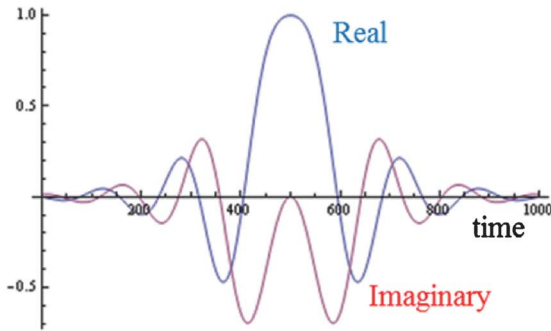


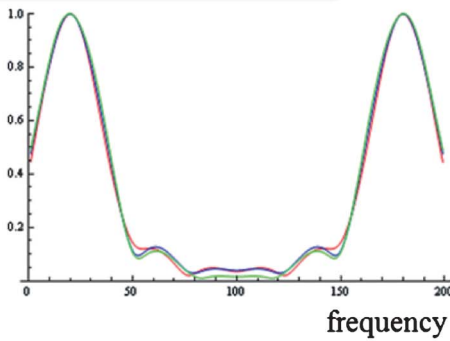
Fig. 8. Resultant magnetization profiles after irradiation of sinc pulse, SLR pulse (excitation) and SLR pulse (inversion). SLR pulse (excitation) shows good profile at flip angle of 90 degree, and SLR pulse (inversion) shows good profile at flip angle of 180 degree.

Adiabatic inversion pulse

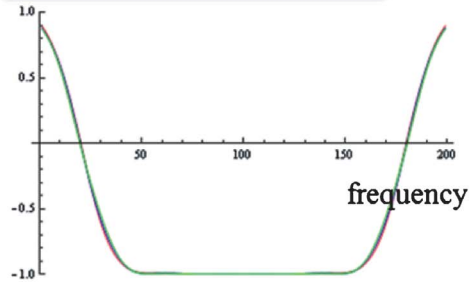


Rotating frame of reference frequency ω

Transverse magnetization



Longitudinal magnetization



— B1 — 1.25 B1 — 1.5 B1

Fig. 9. Magnetization behavior under irradiation of an adiabatic inversion pulse and resultant magnetization profiles. The resultant magnetization profiles show that the adiabatic inversion pulse is tolerant to the amplitude of added RF pulse.

様々な応用

ここまでで、RFパルスの基礎について典型例を交えて述べてきた。これらをベースとして様々な応用がなされている。例えば、照射位相を制御した複合パルスによる周波数選択、傾斜磁場操作を伴った2次元選択励起、血流などを対象として特定の流速の選択励起などの選択制御が用いられている。また、人体への specific absorption rate (SAR) や装置の制約

を加味した制約条件付きRF設計がなされている。さらに、従来から回転磁場を効率的に発生するために2チャンネル照射が使用されてきたが、その強度と位相を変化させ、また多数のチャンネルを用いて高磁場下での照射均一度を向上させるRFシミングが使用され、さらに傾斜磁場の制御も併用した並列送信技術も提案されている。

ま と め

本稿では、RFパルスの基礎について解説した。RFパルスの波形と周波数特性関数との間にフーリエ変換で表される関係を示し、その関係性を用いた磁化の挙動の簡便な理解方法について説明した。この周波数特性による磁化の挙動の理解について限界を示し、そしてより精密な理解を可能とする Bloch 方程式に基づく磁化の挙動の解析について説明した。

利益相反

尾藤は株式会社日立製作所の従業員である。

文 献

- 1) Brown RW, Cheng YCN, Haacke EM, Thompson MR, Venkatesan R. Magnetic resonance imaging: physical principles and sequence design. Wiley-Blackwell, 2014
- 2) 荒木力編著. MRI 完全解説. 秀潤社, 2014
- 3) 巨瀬勝美編著. めざせ MRI の達人. インナービジョン, 2013
- 4) Pauly J, Nishimura D, Macovski A: A k-space analysis of small-tip-angle excitation. J Magn Reson 1989; 81: 43-56
- 5) Pauly J, Le Roux P, Nishimura D, Macovski A: Parameter relations for the Shinnar-Le Roux selective excitation pulse design algorithm. IEEE Trans Med Imaging 1991; 10: 53-65
- 6) Tannús A, Garwood M: Adiabatic pulses. NMR Biomed 1997; 10: 423-434

Basics of RF Pulse Design

Yoshitaka BITO

Healthcare Business Division, Hitachi, Ltd.

Ueno East Tower, 2-16-1 Higashi-ueno, Taito-ku, Tokyo 110-0015

Magnetic resonance is induced by adding an electromagnetic wave having a certain radio frequency (RF). RF pulses, of which duration is relatively short, have a fundamental role to observe biophysical phenomena and to create desired contrast among biophysical tissues by using relaxation, spatial and spectral excitation or suppression, magnetization transfer, and spin correlation. In order to understand the mechanism of these observations or contrast creation, it is necessary to understand the basics of RF pulses. In this review, the basics of RF pulses are explained by two approaches: one is the frequency characteristic function which is calculated by the Fourier transform of an RF pulse, and the other is analysis of magnetization using the Bloch equation. Roughly approximated behavior of the magnetization is explained by the frequency characteristic function, and precise behavior of the magnetization reflecting non-linear characteristic to an RF pulse is explained by analysis using the Bloch equation.