

2. Arterial spin labeling による脳血流定量の最新動向

石田 翔太 京都医療科学大学医療科学部放射線技術学科
 藤原 康博 熊本大学大学院生命科学研究部医用画像科学講座
 木村 浩彦 福井大学医学系部門 / 越前町国民健康保険織田病院放射線科

arterial spin labeling (ASL) は、MRI による非侵襲的な血流計測法であり、動脈血のプロトンを磁気的に標識 (ラベル) して内因性トレーサーとして利用する。さまざまなラベル法が開発されているが、撮像領域上流のラベル面を通過するスピンの勾配磁場と RF パルスを間欠的に印加する pseudo-continuous ASL (pCASL) 法が臨床で広く使用されている。pCASL 法では、ラベル時間 (labeling duration : LD) とラベル終了後から信号収集までの待ち時間 (post-labeling delay : PLD) が脳血流量 (cerebral blood flow : CBF) の定量性に影響する。特に、PLD は、ラベルスピンの組織に到達するまでの時間 (arterial transit time : ATT) の影響を緩和する撮像条件であり、患者背景を考慮した適切な設定が必要である。

pCASL 法を使用して CBF を正確に計測するには、ATT の計測・補正が必要である。しかし、1つの PLD を使用する single-delay ASL は、ATT を計測・補正できないため、最適 PLD においても正確な CBF が取得できない。一方で、複数の PLD を使用する multi-delay ASL は、ATT を計測・補正し、正確な CBF を算出できる。さらに、multi-delay ASL と血管信号抑制 (vascular suppression : VS) パルスを組み合わせる multi-parametric ASL は、CBF や ATT に加えて動脈側脳血液量 (arterial cerebral blood volume : CBV_a) も取得できる。また、これらのパラメータの推定精度を向上させるために、深層学習 (ディープラーニング) によるパラメータ推定法が開発されている。本稿

では、multi-delay ASL, multi-parametric ASL, ディープラーニングによるパラメータ推定法について概説する。

Multi-delay ASL

ラベルスピンは、組織に到達するまで ($0 < t < \text{ATT}$) は動脈血の T1 値 ($T1_a$)、組織到達後 ($\text{ATT} < t < \text{PLD} + \text{LD}$) は組織の T1 値 ($T1_t$) で緩和し、 $\text{PLD} + \text{LD} < \text{ATT}$ ではラベル信号を観測できない^{1), 2)}。ATT は組織ごとに異なり、 $T1_a \neq T1_t$ であるため、ラベルスピンの緩和の程度は PLD とボクセルに依存する。したがって、pCASL 法による CBF 計測は、複数の PLD を使用して ATT を計測・補正する必要がある。さらに、ATT は単なる CBF 算出用の補正係数ではなく、それ自体が重要な脳循環代謝パラメータである^{3), 4)}。一方で、multi-delay ASL は、PLD 数の増加に伴い撮像時間が延長する。したがって、広範囲の ATT を計測可能な複数の PLD を効率良く、十分な信号対雑音比 (signal to noise ratio : SNR) で収集する必要がある。multi-delay ASL は、主に sequential, Hadamard-encoding (もしくは time-encoding), variable-TR の 3 法が使用される。さらに、撮像時間効率とパラメータ推定精度の両立を目的に、これらを組み合わせる方法が報告されている^{5)~7)}。なお、各 multi-delay ASL の詳細は、2022 年の本誌 9 月号を参照されたい⁸⁾。

われわれは、sequential タイプと Had-

amard-encoding タイプを組み合わせる multi-delay ASL を考案し、Hadamard-encoding タイプ単独よりも、長い ATT の測定精度が向上することを報告した⁵⁾。Obara らは、Hadamard-encoding タイプと variable-TR タイプを組み合わせる hybrid タイプを開発した⁶⁾。現在のところ、hybrid タイプが最も効率良く、自由なボース設計が可能な multi-delay ASL である。さらに、hybrid タイプの時間効率性とボース設計の自由度を生かし、もやもや病の脳血流評価に利用されている⁷⁾ (図 1)。

Multi-parametric ASL

一般的に、multi-delay ASL は 1 コンパートメントモデル (single-compartment model : 1CM) を使用するが、multi-parametric ASL は 2 コンパートメントモデル (two-compartment model : 2CM) を使用する (図 2)。ラベルスピンの観測信号に対し、1CM は組織コンパートメント、2CM は血管コンパートメントと組織コンパートメントを仮定するため、1CM と 2CM は、血管内スピンの取り扱いが大きく異なる。血管と組織のスピンコンパートメントを分離できれば、CBF や ATT に加えて、脳機能に関連するさまざまなパラメータを非侵襲的に取得できる¹⁰⁾。

multi-delay ASL は、ラベルスピンが組織に到達した状態を仮定して 1CM を使用する。一方で、multi-parametric ASL は、血管と組織のスピンコンパート