

血流現象

Axel L : Blood Flow Effects in Magnetic Resonance Imaging
(AJR Am J Roentgenol, 1984 ; 143 : 1157-1166)

この論文はMRにおける血流現象に関する総説である。MRによる流れの測定や描出の歴史、MR信号に影響を及ぼす流れの現象、簡単な実験結果、MRによる流速測定について述べられている。イントロダクションにもあるようにMR信号に影響を与える要因としては撮像法、血管形態と血流波形などがあり、これらが非線型に信号に影響を与え、血流の信号が高信号ないし低信号となる点が特徴的である。

AxelはMRにおける血流現象や流速測定の歴史をまとめている。以下、概説する。

流れがMRに影響を与えることはMRIが開発される前の1951年のSuryanの論文に、また、Hahn, Carr, Purcellらによりwashout of saturated spins, production of phase shifts by motion along a gradientの報告が1950年代半ばから後半になされた。ArnoldとBurkhartは1965年にリフォーカスパルスから出ていく励起されたスピンのためスピンエコー信号が低下することを報告し、HaywardやGarrowayは1970年代前半に流速測定を報告した。

MRIで血流を観察した報告は1977年にHinshawによってなされた。Youngは1981年に、Crooksは1982年に部分飽和したスピンのwashoutについて、Crooksは1984年にスピンエコー法で血流信号が低下すること、Grantは1982年に位相シフトについてそれぞれ報告した。これらの実験結果はMRI開発前

になされていた実験結果と基本的に同じであった。

流速測定についてはSingerとCrooksは1983年に通常の画像化の励起パルスの前に別の選択的パルスを与え、この間隔を変化させることで流速測定を行った。Wehrliらは1984年にサブトラクション法で静止部位を消し、流れの情報のみを残すことを報告した。Moranは1982年に速度に依存した画像を得るために移動するスピンの位相シフトを利用することを提唱した。Freibergはリフォーカスパルスを動かし、移動するスピンの血流測定を行い、Georgeは1984年に拍動流の検討を行った。

MR信号に変化を及ぼす流れの現象として3種類が知られている。流入効果、流出効果、流れに伴う位相シフトである。最初の現象についてAxelはwashout of saturated spinsと表現している。スライス選択励起パルスにより部分飽和された血液のスピンのスライス面から流出していき(washout)、全く飽和されていない縦磁化の十分長いスピンをもつ血液がスライス面内に流入して信号が高くなる現象として紹介している。部分飽和されたスライス内のスピンからの信号は低下しているが、スライス内の血液は移動するに従い、縦磁化の大きいスピンをもつ血液に置き換わっていく。スライス厚や流速などにより異なるが、基本的には流速が速くなるに従い、血管の信号は増加し、部分飽和された血液がスライスから流れ出た後は一定の大き

2001年3月14日受理

別刷請求先 〒431-3192 静岡県浜松市半田山1-20-1 浜松医科大学放射線医学教室 磯田治夫

さの信号が出る。この現象は現在、流入効果、inflow 効果、flow-related enhancement と一般的に言われる。この効果は gradient echo 法で強く、現在は MRA に用いられている。さらにマルチスライス法を用いた場合には下流のスライスほど上流のスライス励起時やデータ収集時のパルスによる影響を受けやすい。

流出 (outflow) 効果はスピンエコー法でスライス選択励起パルスを受けたスピンのスライスから流出することにより生じる。最初のスライス選択励起パルスを受けた血液のスピンは流れのために移動し、すべてが信号読み取りのための 180 度リフォーカスパルスを受けて信号を出すわけではない。これもスライス厚や血流に依存するが、基本的には流速が速くなるに従い、血管の信号が低下し、スライス選択励起パルスにより励起されたスピンのスライスからすべて流れ出た後は無信号となる。これは high velocity (flow-related) signal loss といわれるものである。また、スライス面を斜めに横切る血管の場合は元の血管の場所とは異なる部位に血管が投影されてしまう。

流入効果と流出効果の場合の血管信号に影響を与えるものとして層流と栓流の違いがある。層流の場合は血管の中心部から辺縁にかけて最高流速からゼロまでの流速が分布し、これが時間経過とともに信号変化に非線型に影響を与える。栓流の場合は線型で信号に影響を与える。また、スライス面を横切る血管の角度や拍動流であることが信号に大きな影響を与える。

流れに伴い位相シフトが生じる。このとき、強度と時間幅が等しく、極が反対の双極勾配磁場を用いると静止部位のスピンはリフォーカスされるのに対し、勾配磁場方向に移動する励起されたスピンは変化する磁場を経験し、速度に応じた位相シフトが生じる。

これらの血流現象はデータ収集が FID かスピンエコー法か、励起パルス又はリフォーカスパルスがスライス選択的か非選択的か、マルチスライスか否かなどの撮像法によって、異なっ

てくる。

流速測定としては上記の血流現象を応用した四つの方法を述べている。

一つ目は流入効果を利用したものである。励起パルスにより部分飽和した血液中のスピンの縦磁化の大きいスピンの置き換わり、速度に依存した信号が得る。信号収集のためのパルスを与える時間を変えることにより流速が測定できるが、時間がかかる。

二つ目は流出効果を利用したものである。流入効果での方法と同様にスピンエコー法でのスライス選択パルスと信号読み取りパルスの間隔を変化させることにより、流速測定を行うが、これも時間がかかる。

次は流速と直角に励起パルスを与えてスピンを飽和させ、ある一定時間後に流れの方向に沿った断面を画像化することにより、飽和されたスピン (tag) 自体の移動距離で流速測定が可能である。

四つ目は磁場勾配に沿う動きによる位相シフトを測定することによる流速測定方法である。

現在使用されている MR の血管の描出、血流測定などの技術はほとんどこの論文の中に出てくるものであり、現在でも初心者には一読の価値がある。

Axel は論文の一部で組織の灌流画像は当時の MRI では難しくあまり見込みがないと述べているが、以後の進歩により、現在は造影剤と echo planar imaging (EPI) の T_2^* 強調画像による EPI ダイナミック MRI や spin labeling 法である echo planar MR imaging and signal targeting with alternating radiofrequency (EPSTAR) 又は flow-sensitive alternating inversion recovery (FAIR) などの灌流画像が撮像可能になってきている。研究や技術というものは専門家の予想を上回っていくものだと思う。

浜松医科大学放射線医学教室
儀田 治夫