

プロトンにより映し出される世界

藤 永 康 成

画像診断は1895年、レントゲン博士がエックス線を発見したことから始まります。当初は影として見えたものが、100年以上経った現在では断層像を作成することが可能になり、詳細な解剖が把握できるまでになりました。一方で、エックス線を使用しない検査も進歩しています。超音波はより高精度になるとともに3次元画像を可能とし、流れの情報や硬さの情報なども得られるようになりました。MRIについても高精度化するとともに、臓器や病変の血行動態や組織に含まれる分子情報など、解剖以外の機能についても情報が得られるようになっていきます。

私は、MRIを中心に研究を行ってきました。そもそもMRIはmagnetic resonance imagingの略で、日本語では磁気共鳴画像と訳されています。これは、核磁気共鳴(nuclear magnetic resonance, NMR)という現象を利用して人体の内部を画像化したものです。何に対するNMRかと言うと、表題に書かせていただいたプロトン^{註1}なのです。実際は、原子核の陽子もしくは中性子^{註2}のいずれかが奇数の核種であればNMRの対象になります。これは原子核が磁石の性質(磁気モーメント)を持つという意味で、逆に、陽子と中性子の両方が偶数の場合には非磁性核でありNMRの対象になりません。さらに、プロトンは同じ条件で磁気共鳴をさせた場合に、その他の核種と比べて最も信号が高く、さらに人体に豊富に存在するため、MRIの信号を得る対象として用いられています。ただし、MRIが人体に存在するすべてのプロトンからの信号を検出しているかと言えばそうではなく、水と脂肪の信号のみといっても過言ではありません。

もともと、NMRは原子核の内部構造を研究する手段と考えられていました。しかしながら、一定の速度で歳差運動している原子核のラーモア周波数は、原子の結合状態によってわずかに変化すること(化学シフト)がわかりました。これにより物質の分析が可能になり、中枢神経領域や前立腺などでは、MR spectroscopy (MRS)として、様々な物質の組成^{註3}を検討できるようになっています。これは先に述べた「水と脂肪の信号のみ」という言葉に反するのですが、磁場を極めて均一に保ちつつ水の信号を抑制して初めて得られるものであり、通常のMRIとは別です。

さて、実際のMR画像を得る過程を考えてみましょう。ご存じの通り、プロトンは静磁場にさらされると、静磁場方向を軸としてコマのように歳差運動を行います。この状態は安定した熱平衡状態で、プロトンにとっては居心地が良い状態と言えます。たくさんのプロトンを一塊として扱った巨視的なベクトルで表すと、静磁場方向のベクトルのみの状態です。この状態で共鳴周波数のラジオ波を照射すると励起されます。これにより、巨視的なベクトルは静磁場と直交した方向に向き、すべてのプロトンの位相が揃った状態となります。ラジオ波の照射後、プロトンは徐々に居心地の良い熱平衡状態に戻ろうとします。この過程が緩和と

呼ばれており、戻りやすさの違いを信号差として表示し、位置情報を加えたものがMR画像になるわけです。皆さんがご存じのT1強調画像は、静磁場方向の緩和（縦緩和）を強調した画像になり、これはエネルギーを手渡す過程を表しています。また、T2強調画像は静磁場と直交する平面で生じる緩和（横緩和）を強調した画像であり、ラジオ波によって揃えられた位相の分散を示します。横緩和は分子の運動速度や回転などに影響を受けます。また、これらの緩和を促進する働きがある物質も分かっています。それは常磁性体物質で、T1短縮効果の強い物質の代表がメトヘモグロビン、メラニン、MRI造影剤（Gd製剤）などで、T2短縮効果の強い物質の代表がデオキシヘモグロビンやヘモジデリンです。

ここまであまりにもザックリと、なおかつ駆け足でMRIの原理について説明してきました。実際のMRI画像は、プロトンの動きから生じる様々なNMR信号をフーリエ変換^{注4}して得られています。ここから先は波のお話しになりプロトンとは少し離れてしまうので、興味のある方は成書を読んでいただければと思います。画像の裏にある技術や理論を知ることで、画像の見え方も変わってくると思います。

技術の進歩に伴って、MRIの高精度化、高コントラスト化が実現し、さらに水分子の拡散や血流などの機能に係わる部分までMRIによって画像化できるようになりました。造影剤を使用することで、血行動態解析や臓器によっては機能診断も可能な時代となりました。これらの画像の背景に、置かれる環境に左右され、また緩和促進物質などにも影響を受け右往左往するプロトンが目に見えなくなると思います。私自身も、画像化されたプロトンの訴えを紐解いて、より詳細で正確な診断に結びつけられるよう、これからも精進していこうと思っています。

注1：本稿でのプロトンは電子が離れてイオン化した水素原子（ $^1\text{H}^+$ ）のことを指している。一方、陽子も英語でプロトン（proton）と呼ばれるが、 $^1\text{H}^+$ は陽子そのものであり、同一と考えてよい。

注2：中性子1個は電氣的に中性であるが、その内部は不均一であり電荷が分布している、もしくは中性子は正に荷電した陽子と負に荷電した中間子に分離している時がある（湯川秀樹の中間子論）ため、磁気モーメントが形成されると考えられている。

注3：プロトンを対象としたMRSで得られる代表的な代謝物として、N-acetylaspartate (NAA), Creatine (Cr), Choline (Cho), Lactate (Lac), Lipids (Lip), Glutamine (Gln), γ -aminobutyric acid (GABA), Citrate (Ci)がある。ほとんどの物質は、主に中枢神経領域で検出されるが、クエン酸 (Ci)は前立腺で最も高いピークを示し、コリンやクレアチニンとの比は前立腺癌の診断に用いられている。

注4：フーリエ変換とは、複雑な時間の関数を単純な角周波数（sin関数）の（無限の）和に変換すること。すなわち、複雑な波形をシンプルな正弦波の組み合わせに変換することである。

（信州大学医学部画像医学教室教授）