

4. QSM (定量的磁化率マッピング)

米田 哲也

熊本大学大学院生命科学研究部医療技術科学講座

定量的磁化率マッピング (quantitative susceptibility mapping : QSM) は、その名のとおりに、組織が持つ磁化率を定量評価できるようにマップ化して表現する技術である。磁化率そのものは物理的概念であるため、かなり長い時間研究されてきたものであるが、MRIにおける磁化率・磁化率マップについては、まだまだ始まったばかりの研究課題であり、なじみも薄いものと思われる。さらに、このQSMという技術は、ただでさえなじみの薄い磁化率を扱う上に、きわめて数学的要素が強い技術であることも相まって、技術背景が難解となってしまう、理解を妨げているきらいもある。

そこで、本稿では、QSMを研究・臨床に使用する際に必要な事項を拾い上げ、読者の研究等の助けとなることを目的とした。本来であれば、QSMの有用性や臨床例を多く紹介すべきところであるが、技術がまだ臨床に使用されているとは言えない現状と誌幅の都合から、主に将来的にQSMを利用するために知っておくべき技術背景を中心に解説していくこととする。

QSMの目的・定義

物理学的には、組織が外部磁場 (磁束密度) B_0 に対して磁場の変動 (応答) をもたらず場合、その組織は磁化率 χ (ギリシア文字: カイ) を持つと定義される。具体的には、

$$B = (1 + \chi) B_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表される。ここで、 B は組織の存在により影響を受けた磁場である。QSMは、この無次元のパラメータである磁化率 χ を、MRIから得られる magnitude 画像・位相画像を用いて算出しマップ化することを目的とし、どのような手法を用いても、磁化率を算出してマップ化することがQSMと呼ばれているようである。特に、MRI位相信号 θ は、 $\theta = -\gamma \cdot B \cdot TE$ (TEはEcho Time, γ は磁気回転比) で表されているとおりに、磁場 B に鋭敏であり、容易に式 (1) を介して磁化率を算出できるように見える。しかしながら、事はそう簡単ではない。組織が磁性を持つことで位置 r に磁化 $M(r)$ を作り、これがさらに外部磁場を変動させて、組織そのものだけでなく組織の外部にも複雑な磁場変化をもたらす結果、単純に式 (1) のみで記述することを難しくしている (ここでは、磁場 B や磁化 M などはずべて三次元ベクトルで表現されている)。

QSMが直面する問題：解析的磁化率算出法

前節で説明した磁化によって最終的に得られる磁場 $B(r)$ は、数学的には次のように表現される¹⁾。

$$B(r) = \left(1 + \int_V \chi(r') \left\{ \frac{3\cos^2\varphi - 1}{4\pi|r-r'|^3} \right\} d^3r' \right) B_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 φ は静磁場 B_0 と $r-r'$ とのなす角を表しており、 V は関心体積領域を表す。何やら難しそうな式が出てきて、すでに挫折されている方もおられるかもしれないが、QSMが直面している問題を理解するには以下の点を理解すれば十分である。つまり、式 (2) の右辺の中の磁化率 χ を算出したいのであるが、積分は明らかに磁化率とカッコ内の関数との畳み込み積分 (コンボリューション) になっているため、実は k -space 上ではそれぞれのフーリエ変換の積 (図1) を逆変換すればよい^{1), 2)}。すなわち、

$$B(r) = \left(1 + F^{-1} \left[F\{\chi(r')\} \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{k_z}{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \right) \right] \right) B_0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。記号 F はフーリエ変換を、 F^{-1} は逆フーリエ変換を意味している。また、 k_x などは、 k -space データの各方向成分であり、 B_0 は z 方向を向いていると仮定した。式 (1) と見比べていただければ、