

10. 肝MRエラストグラフィの技術極 [KIWAMI]

沼野 智一 東京都立大学健康福祉学部放射線学科

物質の機械的性質の一つである硬さは、物体に力を加えた時に生じる変形(歪み)と、それを元の形に戻そうとする復元力(応力)によって定義される。手は物体に歪みを生じさせると同時に、掌や指先に存在する神経が応力を感じることによって、硬さを知ることができる。さらに、これらの神経は温度も同時に感知する。手で触るといふ行為によって、われわれは「ほぼリアルタイム」で硬さと温度を知ることができる。これを医学に応用したものが「触診」であり、触診は古代ギリシャ時代から利用され続ける優秀な診断技術と言える。とは言うものの、触診は定量的な評価が難しく、深い部位への適用が困難になる場合がある。MRI装置や超音波画像診断装置などを利用したエラストグラフィは、触診が苦手とする「定量的な硬さ評価」と「深い部位への適用」を可能にする画像診断技術である。MRIを利用したMRエラストグラフィ(MRElastography: MRE)は、1995年に報告¹⁾されて以来、脳²⁾、乳房³⁾、肝臓^{4), 5)}、前立腺⁶⁾、骨軟部領域⁷⁾などに適用され、本邦では2022年度の診療報酬改定によって「肝エラストグラフィ」がE202(磁気共鳴コンピューター断層撮影)で600点の加算となり、nonalcoholic steatohepatitis (NASH)による肝線維化診断に利用されている。本稿では、MREの基礎と肝MREの撮像技術に軸足を置いて、技術の極[KIWAMI]を概説する。

剪断波の利用

硬さを知るためには、何らかの力によって対象部位を歪ませる必要がある。MREでは、前述の「歪み・応力」として、体表面に設置する振動子(パッシブドライバ)による振動波を利用する。振動波を含む「波」には縦波(疎密波)と横波(剪断波)があり、代表的な疎密波は音波や地震の初期微動(P波)などである。他方の代表的な剪断波は、弦楽器の弦振動や地震の主要動となるS波などである。疎密波と剪断波の音速には大きな差があり、生体内を伝播する疎密波の音速は、剪断波に比べて100~1000倍となる。MRIは時間分解能に優れた画像診断装置ではないので、疎密波は音速が速すぎるために画像化が困難となる。よってMREでは、対象部位を伝播する剪断波を画像化することで硬さを求める。

剪断波の画像化

MRIは、一般的な画像診断で利用されるMR強度画像(図1 a)に付随して、MR位相画像(図1 b)を出力することができる。しばしば、MR位相画像にはphase wrap(位相ラップ)と呼ばれる縞状のパターンが生じる。MR位相画像の画素値は「位相」なので、 $0 \sim 2\pi$ までしか表示できない。この場合、画素値が 2π を超えた箇所に位相ラップが生じ、隣り合う画素値が不連続となる箇所が

生じる。これにより、前述の縞状のパターンが出現する。これに対して、phase unwrap(位相アンラップ)と呼ばれる、 2π を超える画素値を認識させる画像処理(図1 c)を行うと、画素値の不連続箇所を解消することができる^{8), 9)}。MREは、位相アンラップ処理されたMR位相画像(図1 d)を利用することで、対象内部を伝播する剪断波を画像化する。

グラディエントエコー法によるMREパルスシーケンスダイアグラムを示す(図2 a)。MREパルスシーケンスにはmotion encoding gradient(MEG)と呼ばれる傾斜磁場が印加され、MEGはシーケンスの「微小な変位に対する感度」を増強する。MEGによる効果は、横磁化が発生している間に作用するので、RF励起後からエコーを収集する間の、横磁化が発生している間にMEGを印加する。MEGの効果の説明するために、図2 bで振動(変位)とMEGが横磁化に及ぼす影響を説明する。なお、説明を簡単にするために、各種エンコードや横緩和などによる横磁化の変化は無視する。時間とともに上下に変位する横磁化を、扇子で表す(図2 b $\alpha \sim \epsilon$)。扇子が広がる角度は横磁化の位相分散を示し、向きは位相シフトを示している。最初に、図2 b $\alpha \sim \gamma$ では極性が正のMEGが印加されているので、横磁化の位相分散が発生する。これと同時に、横磁化の上方向への変位と正のMEGは同調しているため、位相シフトも発生する。次に、図2 b $\gamma \sim \epsilon$ ではMEGの極