

1. 四次元速度画像に基づく髄液動態イメージングの臨床応用の現状と展望

松前 光紀*¹/厚見 秀樹*¹/平山 晃大*¹/林 直一*¹
八ッ代 諭*²/梶原 直*³/船登 美岬*³/黒田 輝*²

*1 東海大学医学部外科学系脳神経外科学領域 *2 東海大学大学院工学研究科情報理工学専攻

*3 東海大学医学部付属病院診療技術部放射線技術科

近年の研究で、脳脊髄液 (cerebrospinal fluid : CSF) は脈絡叢以外のあらゆる場所でも産生され、かつ脳実質の間質を自由に行き来し、またクモ膜顆粒以外のあらゆる部位でも吸収され、さらに嗅神経周囲の篩骨篩板から鼻粘膜を通り頸部リンパ節に到達すると理解されている。つまり、CSFは、間質液やリンパ液として重要な役割を果たしている。よって、CSFの挙動を把握することは、脳神経のhomeostasisを理解するために重要であり、これは疾患の病態解析と治療に直結することとなる。

CSFの挙動を把握するために、CSF圧モニター、myelography、radioisotope cisternographyなどが臨床の現場で活躍してきた。しかし、これらの手技は、CSFにトレーサーを投入するために腰椎穿刺などが必要であり、結果として半閉鎖腔である脳・脊髄腔の環境を変化させてしまう。そこで、非侵襲的にCSFの挙動を把握できるMRIが担う役割は大きいと考えられる。本稿では、MR撮像法の一つである位相コントラスト (phase contrast : PC) 法を用いたCSF運動の解析に注目し、その臨床的意義と将来展望を解説する。

CSFの役割

CSFは、①脳に対する浮力効果、②頭蓋腔におけるvolume adjustment、③栄養素の運搬、④タンパク質やペプチドの運搬、⑤浸透圧調整による脳容積の調節、⑥外力に対する緩衝効果、⑦情報の伝達、⑧薬物の運搬、⑨免疫系のコントロー

ル、⑩不要な物質の排除、⑪代謝熱のクーリングなど、神経系がその恒常性を保つ上で重要な役割を担っている。CSFがこれらの機能を発揮するためには、液体としての動きが必要であり、よって非侵襲的にCSFの動きを観測する必要性が生じる。

位相コントラスト (phase contrast : PC) 法によるCSF運動の可視化

MRIにおけるPC法は、双極傾斜磁場を用いて磁気共鳴信号の位相変化から流体の速度を定量して画像化する方法である。位相変化が π (rad)となる速度をvelocity encoding (以下、VENC)として、これに応じて傾斜磁場の大きさを設定する。予想される最大速度に近くなるようにVENCを設定することにより、対象流体の速度域に適した測定ができるのも特徴である。PC法は血流イメージングに広く応用されてきたが、CSFのイメージングでも伝統的に使用されている^{1)~5)}。PC法では、心電図や脈波および呼吸をトリガーとして、head-to-foot、anterior-to-posterior、right-to-leftの空間3軸に時間軸を加えた、四次元速度画像 (4-dimensional velocity mapping : 4D-VM)を得ることが可能である(図1)^{1)~5)}。

4D-VMによるCSFの回転・圧力勾配の可視化

流体速度の時間変化の情報を検出可

能な4D-VMには、さまざまな可能性が存在する。図2に示したように、4D-VMで得られた速度情報を基に、速度ベクトルの回転 (Curl) *や圧力勾配の解析が可能である。この解析をCSFの動きに展開すると、側脳室前角や第三脳室におけるCSFの回転運動を可視化することが可能となる(図3)。頭蓋脊髄腔におけるCSF運動を詳細に観察すると、中脳水道においてCSFは層流として運動するが、そのほかの部分でCSFは渦を伴う乱流を示していることが、4D-VMの回転画像で示された。さらに、4D-VMで観察される回転運動は脳室・クモ膜下腔においてさまざまであり、例えばクモ膜下腔の血管周囲でCSFの回転は増幅され、頸部クモ膜下腔の前方や大後頭孔周囲でも盛んな回転が観察される一方、側脳室体部や円蓋部クモ膜下腔における回転は非常に緩やかである。4D-VMによる回転の観察結果をまとめると、脳室・クモ膜下腔におけるCSF運動は不均一で、一定方向に層流として動くことはほとんどなく、ある部位では激しく攪拌され、一方ではゆっくり拡散するような動きであると推察される。よって、古典的概念である脈絡叢から産生されたCSFが、脈絡叢の拍動と脳室壁の動きにより脳室系から駆出され、クモ膜下腔を長く循環した後にクモ膜顆粒から吸収されるとしたCSF運動の教科書概念に代わり、CSFは自由な向きと速度を保った運動を行っているといった新しい概念が生まれる。

図4に、図3と同一症例の圧力勾配画