

MRI を用いた頸椎領域における CSF flow の評価 —狭窄性病変における検討—

飯田 慎¹, 梶間敏男², 宮坂健司², 中西 正²,
小野千秋², 伊藤勝陽²

¹公立三次中央病院 ²広島大学医学部放射線医学講座

はじめに

近年著しい発展を遂げた MR 装置は撮像条件の自由度が増し、機能的検討への応用が試みられている。特に血管系では非侵襲的な描出や、血流速度の測定が様々な手法を用いて行われている^{1)~3)}。一方、脳脊髄液の動態解析も血管系と同様の手法を用いて検討され、心拍や脈拍に伴う拍動性の移動が報告されている^{4)~7)}。こうした動態評価の一手法である phase contrast cine MRI (以下 PC-cine MRI) は phase contrast 法に心電図あるいは指尖脈波同期を組み合わせたもので、流れに伴う位相の変化を利用して、その流速を測定することができる^{5),6),8),9)}。

MRI を用いた脳脊髄液の拍動性の評価に関しては、これまでに水頭症および脊髄空洞症を対象とした頭頸部領域に応用されているが^{8)~13)}、これらの報告では 1 スライスレベルでの横断面を用いて流速の経時的変化を検討している。また矢状断面による検討も散見されるが、脳脊髄液に生じる flow void を評価しており^{14),15)}、これまでに複数の横断面あるいは、矢状断面を用いて頸椎領域全体での脳脊髄液の動態について定量的に検討された報告はない。

今回は矢状断面の PC-cine MRI を用いて、

多椎体レベルにおける流速測定を行い、頸椎領域での脳脊髄液の動態に関し、頸椎レベルによる差異および脊柱管の狭窄性病変による変化を検討したので報告する。

対象および方法

装置は GE 社製 MRI 装置 Signa Advantage (静磁場強度 1.5 T) を使用し、受信コイルとして頸椎用表面コイルを用いた。通常の T₁, T₂ 強調画像 (TR/TE=400/18, 7000~8000/112 ms) の矢状断面および脊髄に直交する横断面を撮像し、脊柱管の狭窄性変化の有無を確認した後、正中位矢状断の PC-cine MRI を追加撮像した。PC-cine MRI の撮像条件はスライス厚 5 mm, 撮像視野 22 cm, マトリックスサイズ 128×256, 加算回数 2, TR は脈拍数に依存し脈波周期の 16 分の 1 に, TE は撮像条件下で最短とし 10~14 ms に設定した。PC-cine MRI では脈波トリガーからの時間的差異をもとに一脈波周期を 16 分割し, 位相処理された 16 枚の流速画像が得られる^{5),6),8)}。流速画像は, その部位における流速および方向を信号強度として表示したもので, 頭尾方向の流れが高信号, 尾頭方向の流れが低信号に表示される。本法では測定対象の流速に合わせて, あら

キーワード cerebrospinal fluid, flow dynamics, MRI, peripheral gating

かじめ速度領域を設定するが（速度エンコーディング）、今回は数十 mm/s の流速検出を目的としたため、速度エンコーディングは 100 mm/s とした。

対象は健常成人 18 名（22～54 歳，平均 29.9 歳）および，頸椎レベルで脊柱管狭窄のある椎間板ヘルニアおよび頸髄症患者 14 名（19～77 歳，平均 56.6 歳）とした。患者群において狭窄を有する椎間板レベルの分布を Table 1 に示した。上記正常群および患者群に対し PC-cine MRI を撮像し，得られた 16 位相の流速画像それぞれから，C2 から Th1 の各頸胸椎椎体中央レベルにおける脊髄前方での脳脊髄液の流速を求めた。また，脈波トリガー点を 0 とし，16 位相各点での位相ずれを一脈波周期に対する百分率で表し，各位相での流速をプロットした流速グラフを作成した。このグラフでは次の脈波トリガー点が 100% の位相に相当するが，脳脊髄液の動態評価として，この流速

グラフから以下の指標を計測した（Fig. 1）。

- (1) 流速振幅（mm/s）：頭尾および尾頭方向それぞれの最大流速の絶対値の和。
- (2) 最大位相および最小位相（%）：頭尾方向を +，尾頭方向を - とする最大流速に達した点における脈波トリガーからの遅れを，それぞれ脈波周期に対しパーセント表示したもので，脈波トリガーが 0 および 100% に相当し，16 分割された各位相の間隔は脈波周期の 6.25% とな

Table 1. Stenotic Levels in the Patients

disc level	stenosis(+)
C2/3	0
C3/4	6
C4/5	8
C5/6	8
C6/7	8
C7/Th1	1
total	31

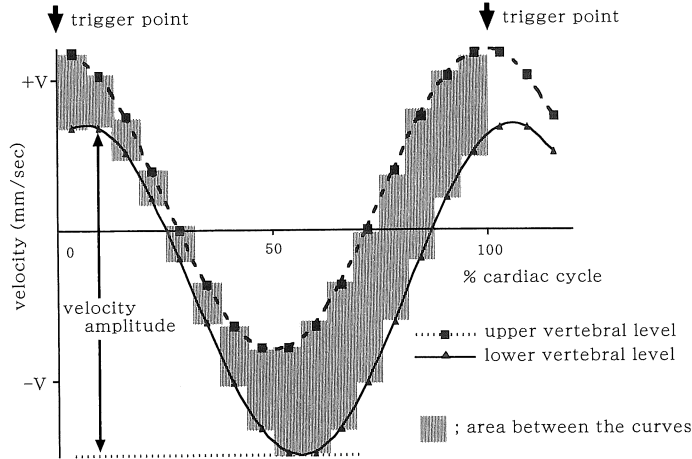


Fig. 1. Idealized velocity-time graphs of CSF within one cardiac cycle. Velocity profile of CSF at two serial vertebral levels are shown. Sixteen sampling points were obtained per cardiac cycle. The sum of the difference in velocity at each sampling point represents the area between the curves. An increase in the difference between the shapes of the two graphs reflects an increased area.

1999年3月15日受理 1999年4月30日改訂

刷請先 〒728-8502 広島県三次市東酒屋町字敦盛 531 公立三次中央病院放射線科 飯田 慎

る。最大位相あるいは最小位相の値が脈波トリガー近傍に分散するときは、流速グラフの連続性を考慮し、脈波トリガー直後のものを100%以上の値として表記した。

(3)流速グラフ幅：各位相それぞれにおける上下二椎体の流速差の絶対値について、一脈波周期分の総和（流速グラフのずれ面積）を求め、その二椎体における流速振幅の相加平均で割ったもの。流速グラフが同様の経時変化を呈するほど小さな値となり、上下の椎体レベルにおけるグラフ形状のずれの指標として用いた。

正常群での流速振幅、最大位相および最小位相のそれぞれに関し、C2 から Th1 の各椎体レベルにおける値を求め、比較検討した。また連続する上下の椎体間に関して、流速振幅の差および流速グラフ幅を求めた。患者群においては狭窄を伴う椎間板レベルの上下の椎体において上記計測値を求め、正常群と比較検討した。ただし、上下二椎体間の値の差に関しては上位の椎体の値から下位のものを減じて求めた。更に患者群では上下の椎体間に狭窄を有する部位と有さない部位とで2群に分け、流速振幅の差および流速グラフ幅について比較検討した。

統計処理として狭窄の有無による比較および患者群と正常群との比較には Mann-Whitney の U 検定を、同一群内における椎体レベル相互の比較には Wilcoxon の符号順位和検定を用い、危険率5%未満を有意差ありとした。

結 果

健常者における流速画像の一例を Fig. 2 に示した。Fig. 2a は頭尾方向に流速最大である位相（最大位相）、Fig. 2b は頭頭方向に最大の位相（最小位相）における画像である。脳脊髄液の信号強度は Fig. 2a では高信号、Fig. 2b では低信号であるが、いずれの画像も椎体のレベルによらず、均一な信号強度を示している。Fig. 2c は上記画像より得られた流速グラフを C2, C4, C6 および Th1 の各椎体レベルについ

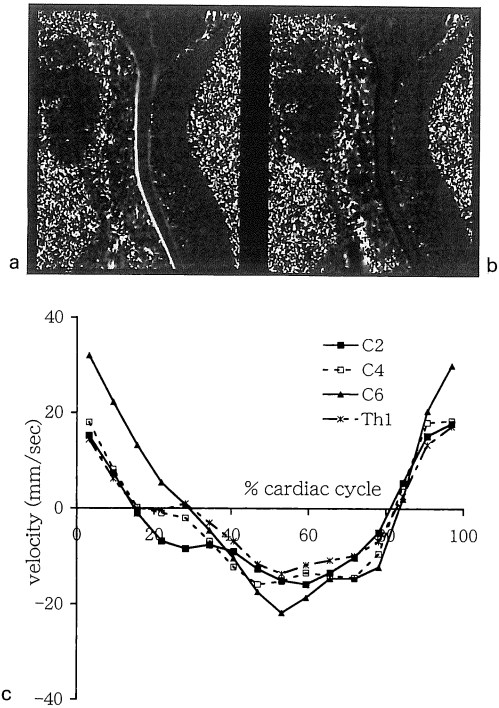


Fig. 2. Images and data from a male control aged 29

a. Phase contrast velocity image obtained at 940 ms after trigger point. CSF flow is cranio-caudal, and demonstrates high intensity at all vertebral levels.

b. Phase contrast velocity image obtained at 630 ms after trigger point. Maximum caudocranial velocity appears as low intensity at all locations within major CSF pathways.

c. Flow-velocity graphs at four vertebral levels. CSF velocity scale is shown on left vertical axis. The 16 data points on the horizontal axis represent percentage of cardiac cycle. All graphs show almost the same pattern.

て表したものである。流速振幅は 33.6~53.8 mm/s の値を呈し、いずれの椎体レベルにおいても、脈波トリガー近傍が最大位相に、50%近傍の位相が最小位相に相当した。全位相を通しての流速グラフの形状は椎体レベルによらず同様で、脈波と同じ周期の to and fro を呈した。

同様に脊柱管の狭窄を有する患者の画像を

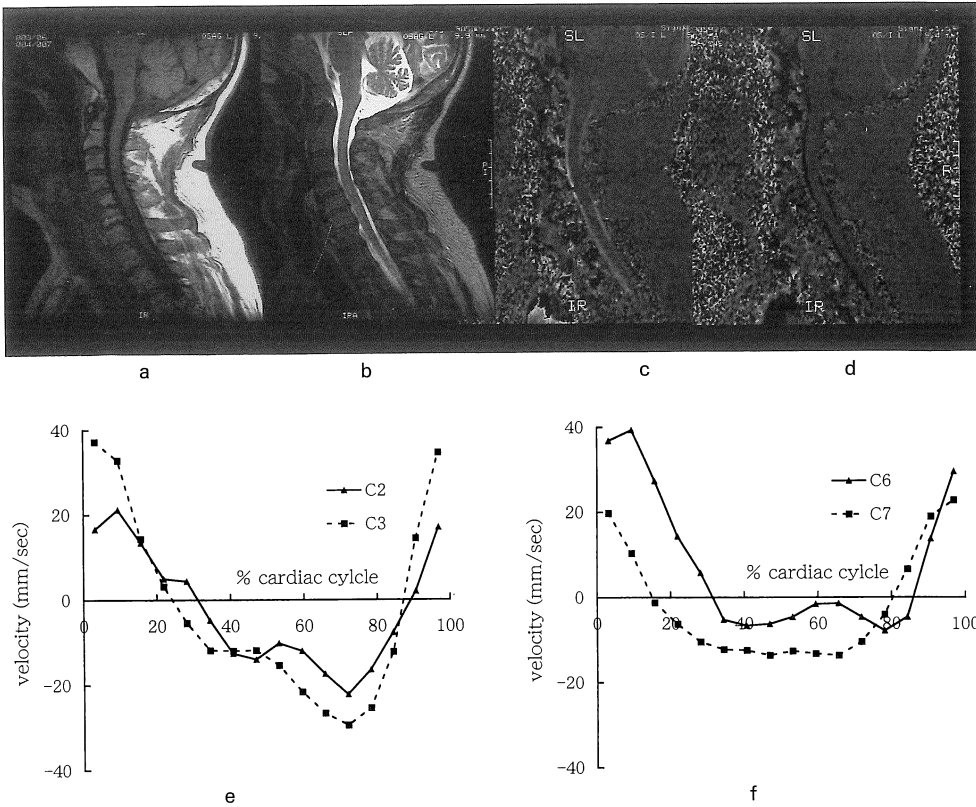


Fig. 3. Images and data from a female patient with spinal canal stenosis aged 57
 a. T₁WI.
 b. T₂WI. These images, obtained in a middle sagittal plane, show spinal canal stenosis at C4/5, C5/6 and C6/7 disc levels.
 c. Phase contrast velocity image obtained at 1023 ms after trigger point. CSF flow is craniocaudal but the intensity of CSF is inhomogeneous.
 d. Phase contrast velocity image obtained at 680 ms after trigger point. Major CSF flows caudocranially and appears as low intensity area.
 e. Flow-velocity graphs at C2 and C3 vertebral levels in the patient. C2/3 is one of the non-stenotic levels and the flow patterns of them are similar to those of controls.
 f. Flow-velocity graphs at C6 and C7 vertebral levels in the patient. The flow patterns at this stenotic C6/7 level differ from each other. The area between the curves at the two vertebral levels is greater than those of controls and non-stenotic C2/3 level of the patient.

Fig. 3 に示した. Fig. 3a, b はそれぞれ頰部正中矢状断における T₁, T₂ 強調画像を示し, Fig. 3c, d は各断面の最大, 最小位相における流速画像を示す. C4/5 から C6/7 の各椎間板レベルにおいて前方より硬膜が圧排されているが, 流速画像では脳脊髄液の信号強度は不均一で, 狭窄レベルでは低くなっている. この患者

の流速画像より求めた流速グラフを Fig. 3e, f に示した. Fig. 3e は上下椎体間に狭窄を有しない C2, C3 レベル, Fig. 3f は狭窄を有する C6, C7 レベルのものである. 最大位相は健常人同様, 脈波トリガー近傍で認めるものの, 最小位相は一定の値を示しておらず, それぞれの椎体レベルでグラフの形状は異なっている. 特

に尾頭方向での流速に関しては、椎体レベルによる格差が大きく、C6, C7 レベルでは低値を示している。流速振幅は C2, C3 レベルでそれぞれ 43.4, 66.6 mm/s であり、C6, C7 レベルではそれぞれ 47.2, 37.4 mm/s であった。グラフのずれは C6, C7 間の方が、大きくなっているが、流速グラフ幅も C2-3 での 2.4 に対し、狭窄部を介する C6-7 では 4.7 とより大きな値を呈した。

1. 椎体レベルにおける比較

正常群および患者群で得られた各椎体レベルにおける流速振幅、最大位相および最小位相を Table 2 に示した。各測定値において上段は正常群、下段は患者群のものであるが、患者群における C3 から C7 の値は脊柱管狭窄が存在する部位の数値を示す。

(1)流速振幅について

正常ボランティアにおいて、C3 から C6 にかけて流速振幅は 54.5~59.6 mm/s の値を呈し、これら椎体レベル相互での有意差は認めなかったが、C2 および C7, Th1 レベルに比較して、高値を示した (P<0.05)。

患者群での流速振幅は 28.9~37.3 mm/s と、いずれの椎体レベルにおいても正常群に比較して低値を示した (P<0.01)。狭窄部に関与していない C2, Th1 椎体レベルも同様に正常群より低値を示し、正常群で見られた椎体レベル間での差は認めなかった。

(2)最大位相および最小位相について

最大位相は正常群および患者群とも脈波トリガーの近傍に認め、100%前後の値を呈した。また下位の椎体ほど高値を示し、患者群と正常群との間に有意差は認めなかった。一方、最小位相は正常群、患者群とも脈波周期に対し、脈波トリガーから 60%前後に認め、やはり両群間での差は認めなかった。

2. 連続する二椎体間での差の検討

連続する二椎体レベル間の流速振幅の差および流速グラフ幅について得られた値を Table 3 に示した。上段が正常群、下段が患者群のものであるが患者群における C3-4 から C6-7 の各々の値は狭窄を認める病変部のものである。

(1)流速振幅の差について

正常群では C2-3 椎体間および C6-7 椎体間の流速振幅の差は、他の椎体間に比較して大であったが、患者群では逆に C2-3 椎体間での差は、他のものに比較して小さな値を呈した。

(2)流速グラフ幅について

流速グラフ幅はいずれの椎体レベル間においても患者群の方が正常群に比較し、2 倍程度の高値を示した (p<0.05)。

3. 患者群における脊柱管狭窄の有無による連続二椎体間での検討

(1)流速振幅の差について

対象とした 14 名の患者群において、C2/3 から C7/Th1 までの 6 レベル、計 84 椎間板レ

Table 2. CSF Flow Dynamics at Each Vertebral Level(mean±SE)

	group	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Th1
velocity amplitude** (mm/s)	N	41.6±2.4*	54.5±4.6	58.2±4.8	57.6±4.9	59.6±4.6	49.2±4.5*	45.1±3.8*
	P	30.7±4.5	30.6±7.0	37.3±7.2	33.0±6.8	28.9±5.8	31.2±5.2	31.4±5.9
systolic peak (% cardiac cycle)	N	98.7±1.0	97.4±0.9	97.7±1.0	98.5±1.0	99.1±1.1	100±1.1	102±1.3
	P	97.3±3.7	97.2±3.3	96.3±4.1	94.9±3.4	106±2.8	98.5±3.6	105±2.6
diastolic peak (% cardiac cycle)	N	60.7±2.3	59.1±2.6	58.0±2.6	60.5±2.0	64.4±2.6	62.3±2.5	65.2±2.9
	P	60.5±3.1	57.8±4.5	53.3±3.2	52.2±6.5	60.8±3.2	60.8±3.2	61.3±5.1

* C2, C7 and Th1 vertebral levels are significantly lower than control levels (p<0.05)

** Control values are significantly higher than those of patients at all vertebral levels (p<0.05)

N: normal controls

P: patients

Table 3. Difference between the Two Serial Vertebral Levels(mean±SE)

	Group	C2-3	C3-4	C4-5	C5-6	C6-7	C7-Th1
Velocity amplitude* (mm/s)	N	-12.6±3.1	-4.8±4.5	1.6±4.4	0.0±1.8	10.3±2.9	1.7±2.5
	P	0.5±4.8	-6.7±5.3	4.4±3.0	4.1±2.9	-2.3±3.7	-3.6±3.6
area between the curves**/ mean velocity amplitude	N	2.0±0.1	1.6±0.2	2.3±0.4	2.3±0.5	1.9±0.2	2.9±0.6
	P	3.7±0.3	4.7±0.4	4.3±0.3	4.8±0.4	5.7±0.7	3.6±0.3

* Differences at C2-3 and C6-7 are significantly greater than control levels(p<0.05)

** Significant difference between patients and controls(p<0.05)

N: normal controls

P: patients

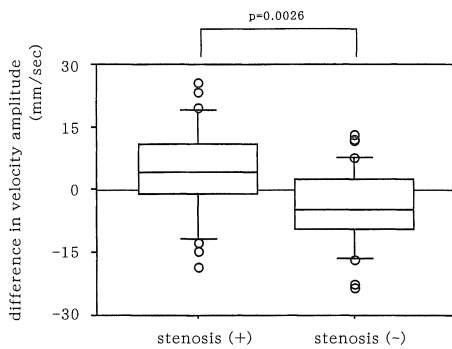


Fig. 4. Difference in flow amplitude between the two serial vertebral levels in the patients. The difference in velocity amplitude at the stenotic level is significantly greater than that at the non-stenotic level (p=0.0026).

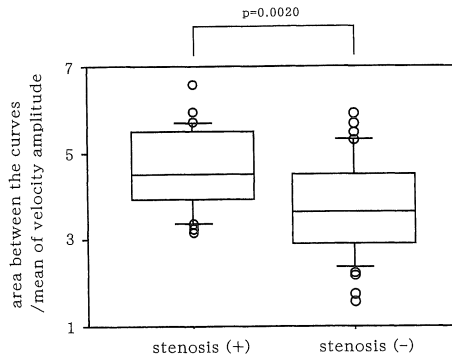


Fig. 5. Standardized area between the two graphs in the patients. Area between the curves per mean velocity amplitude at the stenotic level is significantly greater than that at the non-stenotic level (p=0.0020).

ベルのうち、狭窄を有する31椎間板レベルを狭窄群とし、非狭窄群の53椎間板レベルと分類した。狭窄、非狭窄の両群間での流速振幅の差についての比較をFig. 4に示した。狭窄群での流速振幅の差は、非狭窄群に比較し有意に高値を呈した(p=0.0026)。

(2)流速グラフ幅について

患者群の流速グラフ幅に関し、流速振幅の差と同様に狭窄の有無で分類した2群間での比較をFig. 5に示すが、狭窄群の方が有意に高値を示した(p=0.002)。

また最大位相および最小位相では、いずれも狭窄の有無による両群間での差は認めなかった。

考 察

脳脊髄液は脳室壁の脈絡叢で産生され、脳および脊髄のくも膜下腔を灌流した後、傍矢状洞のくも膜顆粒を通して静脈系に吸収されるが、その代謝率は低く移動は非常に低速である¹⁶⁾。脳脊髄液の循環動態の評価には、脳槽シンチグラフィ^{17),18)}の他に、ミエログラフィーを用いた検討が報告されている^{19)~21)}。脳脊髄液は血液の流入に伴う脳実質の体積変化と脳実質全体の動きによるポンプ機能および脳脊髄液腔における弾性の相互作用により、脳室系から駆出されると考えられている^{8),19),21)}。MRIを用いた脳脊髄液の拍動性の評価に関しては、水頭症および脊髄空洞症を対象とした頭頸部領域での

横断面1スライスレベルによる検討が行われているが^{8)~13)}、頸髄領域全体における脳脊髄液の動態について検討した報告は少なく、頸髄症を対象とした手術前後の検討を散見するのみである^{14),15)}。ただ、これらの報告では脳脊髄液の拍動に伴うflow voidを検討項目としており、椎体レベルによる流速変化についての定量的評価は検討されていない。

今回の目的は頸椎領域における脳脊髄の動態に関し、椎体レベルによる変化および脊柱管の狭窄性病変による変化を検討することとしたが、多椎体レベルにおける横断面を用いることは検査時間も延長し、実際の臨床での応用は困難である。こうして正中矢状断による検討を行ったが、今回の正常群における流速測定値は過去の報告と同様の値を呈し、脈波周期に対する動態も過去の報告とよく一致した^{8),13)}。すなわち、脈波トリガー近傍の収縮期には頭尾方向の、拡張期には尾頭方向の流れを呈し、その経時的変化については椎体レベルによる差を認めなかった。このことから、頸椎領域では一塊となった脳脊髄液が、頭尾方向に同位相で拍動していると考えられる。

一般に連続性のある管腔を流れる液体の総量が一定の場合、管径が細いほど流速は速くなる。同様に頸椎領域において脳脊髄液が一塊で移動すると考えるなら、脳脊髄液腔の大きさに相関して、流速は変化することが予想される。正常群で認めた椎体レベルによる流速振幅の差異と、くも膜下腔の空間的広がりとの相関に関しては、今回の検討では矢状断面のみであり正確には評価できていない。しかしながら、C5~C6椎体レベルにおける脊髄は頸膨大の高さに相当し、くも膜下腔は相対的に狭小化することが予想され、同部での流速が高値を呈したものと考えられる。また、C2領域ではMagendie孔およびLuschka孔に近く、狭い孔から駆出された脳脊髄液の高速な流れが脳脊髄液に乱流を生じさせ、結果として同部での頭尾方向の流速を低下させていることも考えられる。

次に患者群では正常群と比較し、流速振幅はいずれの椎体レベルにおいても低値を示したが、その原因には対象とした正常群と患者群との年齢層の違いおよび脊柱管の狭窄に伴うくも膜下腔径の不整が挙げられる。まず、年齢による因子についてであるが、正常群では平均29.9歳で、患者群の56.6歳と大きく異なっている。一般に中枢神経系は加齢に伴って萎縮し、脳脊髄液腔の相対的増加を来す。更に血流量の変化や、血管硬化性の変化も伴い、脳脊髄液の駆出力への影響が予想される。しかし正常群を対象とした検討では、年齢層による有意差は認めなかったとする報告があり²²⁾、今回の流速振幅の差の主たる原因とは考え難いと思われる。次にくも膜下腔径の不整に関しては、局所的狭窄により脳脊髄液の流路の連続性およびその一塊とした拍動性が障害され、狭窄部上下における乱流も加わって流速が変化していると考えられる。更に患者群では狭窄部に直接関与していないC2椎体レベルにおいても流速振幅の低下を認めたが、これは管腔内の一部に生じた乱流によってポンプ機能と、脳脊髄液腔の弾性効果との協調作用が障害されたことを示唆する。

また、こうした脳脊髄液の拍動の乱れは、MR信号における位相分散の原因となり、流速測定への影響も生じるとされている^{23)~25)}。今回の患者群では、脊柱管は脊髄前方での圧排に起因して狭窄しており、くも膜下腔の完全閉塞は生じていない。最大位相および最小位相に関して、狭窄の有無による差異を認めなかったのは、脳脊髄液がこれらの狭窄部において、より広い流路を求めて左右および後方へと迂回し流れているためと考えられる。狭窄部におけるそうした脳脊髄液の迂回路の評価には、矢状面のみならず、横断面による流速の検討が必要であるが、本手法では一断面の撮像に数分を要し、多数の狭窄部位での検討は臨床的には困難である。

今回の検討では、脳脊髄液における拍動性の

乱れの評価に、新たな指標として流速グラフ幅の応用を試みた。これは連続する上下二椎体に関して、一脈波周期全体の流速グラフの形状のずれを数値化することを目的としたものである。これまでの報告では、最大流速および最大位相による検討が行われているが^{8),10),12)}、今回対象とした患者群では流速グラフの形状が乱れており、正常群で認めた明瞭な to and fro の形態を示さず、一点での流速および位相の評価では有意差を見いだせない症例もあった。しかし、狭窄部位の上下の椎体レベルに関しては、一脈波周期の 16 の全計測点の中には、流速の大きく異なる位相が存在しており、全位相での流速差を積分することで、グラフのずれの大きさを検出することができる。こうして得られた流速グラフ幅は 2 つのグラフ間における位相のずれ、および流速の大きさを正確に示したものではないが、患者群と正常群との差異のみならず、患者群内における狭窄群と非狭窄群との差異を検出しており、流速振幅と同様に脳脊髄液の拍動性の乱れ、およびその原因となる脊柱管の狭窄の指標に十分なり得ると考えられる。

また今回我々の用いた手法は椎間板ヘルニアおよび頸髄症患者に対し、くも膜下腔の局所的な変形および狭窄を機能的側面から非侵襲的に評価できるものと思われる。日常臨床では MRI により、様々な病態に伴う脊柱管の狭窄性変化が描出されるが、形態変化と神経症状の解離している症例に遭遇する経験も多く、形態的な評価のみでは病態を過小、あるいは過大に評価することもあり得る。ここで、多椎体レベルにおける脳脊髄液の動態評価を検討することにより、形態的变化を機能的側面から裏付けることが可能となり、症状と形態の解離した病態の把握にも有用と思われる。更に流速変化の検討を進めることにより、逆に脳脊髄液腔の拡張性変化において、くも膜嚢胞と単純な拡張との鑑別への応用も期待される。しかしながら、撮像断面の設定、流速検出方向、空間分解能がその問題点として挙げられる。更に、指尖脈波と

の同期に関係する不整脈も問題点となり得る。撮像断面に関しては、正中矢状断面での評価を行ったが、被検者の脊柱が撮像面に対し斜めに位置した場合、および脊柱管が強く屈曲した場合は流速が過小に評価される。また流速の検出方向を頭尾方向としたが、撮像断面外への脳脊髄液の流出は検出できない。空間分解能に関しては、1 ボクセルが $1.7 \times 0.9 \times 5.0$ mm であり、著明に狭小化した脳脊髄液腔での評価は困難である。また脈不整を有する被検者では脈波周期を 16 等分できず、流速の経時的変化は検討できない。しかし、正中矢状断面での評価は一度に多数の椎体レベルを対象にすることができ、通常の検査に追加することは十分に可能である。今後は、脊柱管狭窄症の術前術後における脳脊髄液の動態評価をはじめ、くも膜嚢胞等、多くの疾患に本手法を応用し、その有用性を検討したい。

ま と め

正常群および脊柱管狭窄症患者群を対象に頸椎領域における脳脊髄液の動態について比較検討した。計測断面として正中矢状断を応用することにより、多椎体レベルでの検討が可能になり、患者群では脊柱管狭窄部の上下において、一心拍での経時的流速変化が大きく異なっていることが示された。また患者群では最大流速の低下も認め、くも膜下腔の狭小化によって生じる流速の乱れがこれらの原因であると考えられた。本手法により頸椎領域における脊柱管の狭窄性変化に対し、形態的狭窄を裏付ける機能的側面の非侵襲的な評価が可能であることが示唆された。

文 献

- 1) Suryan G : Nuclear resonance in flowing liquids. Proc Ind Acad Sci 1951 ; Section A 33 : 107-111
- 2) Singer JR : Blood-flow rates by NMR measurement. Science 1959 ; 130 : 1652-1653

- 3) Bryant DJ, Payne JA, Firmin DN, Longmore DB : Measurement of flow with NMR imaging using a gradient pulse and phase difference technique. *J Comput Assist Tomogr* 1984 ; 8 : 588-593
- 4) Edelmann RR, Wedeen VJ, Davis KR, Widder D, Hahn P, Shoukimas G, Brady TJ : Multiphasic MR imaging : a new method for direct imaging of pulsatile CSF flow. *Radiology* 1986 ; 161 : 779-783
- 5) 熊谷守雄, 山田 弘, 板井 昇, 他 : Subdural fluid collection (S.F.C) における髄液拍動流の検討. *小児の脳神経* 1994 ; 19 : 3-11
- 6) Enzmann DR, Pelc NJ : Cerebrospinal fluid flow measured by phase-contrast cine MR. *Am J Neuroradiol* 1993 ; 14 : 1301-1307
- 7) 松沢 等, 飛騨一利, 宝金清博, 岩崎喜信, 阿倍 弘, 秋野 実, 斎藤久壽 : Presaturation band を用いた cine MRI による脊髄空洞症の髄液動態の定量的解析について. *脳神経* 1992 ; 44 : 24-29
- 8) Enzmann DR, Pelc NJ : Normal flow patterns of intracranial and spinal cerebrospinal fluid defined with phase-contrast cine MR imaging. *Radiology* 1991 ; 178 : 467-474
- 9) 松田昌夫 : シネモード MRI による脳脊髄液低速域拍動流定量化の実験的検討. *金医大誌* 1991 ; 16 : 155-165
- 10) Wolpert SM, Bhadelia RA, Bogdan AR, Cohen AR : Chiari I malformations : assessment with phase-contrast velocity MR. *Am J Neuroradiol* 1994 ; 15 : 1299-1308
- 11) Terae S, Miyasaka K, Abe S, Tashiro K : Increased pulsatile movement of the hindbrain in syringomyelia associated with the Chiari malformation : cine-MRI with presaturation bolus tracking. *Neuroradiology* 1994 ; 36 : 125-129
- 12) Mascalchi M, Arnetoli G, Inzitari D, Pozzo GD, Lolli F, Caramella D, Bartolozzi C : Cine-MR imaging of aqueductal CSF flow in normal pressure hydrocephalus syndrome before and after CSF shunt. *Acta Radiol* 1993 ; 34 : 586-592
- 13) Nitze WR, Bradley WG Jr, Watanabe AS, Lee RR, Burgoyne B, O'Sullivan RM, Herbst MD, WG : Flow dynamics of cerebrospinal fluid : assessment with phase-contrast velocity MR imaging performed with retrospective cardiac gating. *Radiology* 1992 ; 183 : 395-405
- 14) 浮田泰孝 : 頸髄症のシネ MRI. *中部整災誌* 1993 ; 36 : 1197-1204
- 15) 本城康臣 : 頸髄症の術後シネ MRI. *中部整災誌* 1995 ; 38 : 843-851
- 16) Cutler RW, Page L, Galicich J, Watters GV : Formation and absorption of cerebrospinal fluid in man. *Brain* 1968 ; 91 : 707-720
- 17) Milhorat TH : The third circulation revisited. *J Neurosurg* 1975 ; 42 : 628-645
- 18) Henriksson L, Voigt K : Age-dependent differences of distribution and clearance patterns in normal RIHSA cisternograms. *Neuroradiology* 1976 ; 12 : 103-107
- 19) Feinberg DA, Mark AS : Human brain motion and cerebrospinal fluid circulation demonstrated with MR velocity imaging. *Radiology* 1972 ; 163 : 793-799
- 20) Du Boulay G, Shah SH, Currie JC, Logue V : The mechanism of hydromyelia in Chiari type 1 malformations. *Br J Radiol* 1974 ; 47 : 579-587
- 21) Du Boulay G, O'Connell J, Currie J, Bostick T, Verity P : Further investigations on pulsatile movements in the cerebrospinal fluid pathways. *Acta Radiol Diagn Stockh* 1972 ; 13 : 496-523
- 22) Gideon P, Thomsen C, Stahlberg F, Henriksen O : Cerebrospinal fluid production and dynamics in normal aging : a MRI phase-mapping study. *Acta Neurol Scand* 1994 ; 89 : 362-366
- 23) Bradley WG Jr, Waluch V, Lai KS, Fernandez EJ, Spalter C : The appearance of rapidly flowing blood on magnetic resonance images. *Am J Roentgenol* 1984 ; 143 : 1167-1174
- 24) Bradley WG Jr, Waluch V : Blood flow : magnetic resonance imaging. *Radiology* 1985 ; 154 : 443-450
- 25) Bradley WG Jr, Kortmann KE, Burgoyne B : Flowing cerebrospinal fluid in normal and hydrocephalic states : appearance on MR images. *Radiology* 1986 ; 159 : 611-616

MR Evaluation of Cervical CSF Flow : An Examination in Patients with Spinal Canal Stenosis

Makoto IIDA¹, Toshio KAJIMA², Kenji MIYASAKA²,
Tadashi NAKANISHI², Chiaki ONO², Katsuhide ITO²

¹*Department of radiology, Miyoshi General Hospital
538 Higashisakeya-cho, Miyoshi-shi, Hiroshima 728-8502*
²*Department of Radiology, Hiroshima University School of Medicine*

To evaluate the flow dynamics of cerebrospinal fluid (CSF) throughout the cervical spine, 18 healthy controls and 14 patients with spinal canal stenosis were examined by phase-contrast cine MR. MR imaging was performed using a sagittal technique that is flow-sensitive in the craniocaudal direction. Flow encoding depicted craniocaudal flow as high intensity and caudocranial flow as low intensity. In this technique, either retrospective cardiac or peripheral gating was used to cover the complete cardiac cycle. This pulse sequence yielded 16 quantitative flow-encoded images per cardiac cycle. Using a region-of-interest cursor at each vertebral level, the graphs of flow-velocity versus time were generated.

The recorded CSF at each vertebral level in the controls showed almost the same pattern in the change of flow in the craniocaudal direction, indicating that the onset of cranioaudal CSF flow was synchronous with the onset of cardiac systole in these subjects. At all vertebral levels, flow-velocity time curves showed the same variation in pattern.

CSF flow was significantly lower in patients than in controls at each vertebral level ($p < 0.01$). In addition, the flow patterns of the patients with spinal canal stenosis differed at each vertebral level. As a result, the total sum of the difference in velocity between graphs of two serial vertebrae at all sampling points (the area between the curves : ABC) per mean velocity amplitude in the patients was significantly higher than controls ($p < 0.05$). Furthermore, the ABC per mean velocity amplitude at the stenotic level was significantly larger in the patients than that at the non-stenotic level ($p < 0.01$).

These data suggest that turbulent CSF flow occurs at the stenotic level. Thus, assessment of CSF flow dynamics is a useful adjunct to routine MRI in patients with spinal canal stenosis.