

Visualization of hemodynamics in intracranial arteries using time-resolved three-dimensional phase-contrast MRI

メタデータ	言語: jpn 出版者: 浜松医科大学 公開日: 2017-01-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山下, 修平 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10271/813

学位論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨

学位記番号	医博論第 4 5 5 号	学位授与年月日	平成 2 0 年 5 月 1 6 日
氏 名	山 下 修 平		
論文題目	Visualization of hemodynamics in intracranial arteries using time-resolved three-dimensional phase-contrast MRI (時間分解三次元位相コントラスト MRI を用いた頭蓋内動脈血流 動態の可視化)		

博士(医学) 山下 修 平

論文題目

Visualization of hemodynamics in intracranial arteries using time-resolved three-dimensional phase-contrast MRI

(時間分解三次元位相コントラスト MRI を用いた頭蓋内動脈血流動態の可視化)

論文内容の要旨

[はじめに]

血管病変の発生と進行には様々な因子が関与するが、動脈硬化や動脈瘤には好発部位が存在することからも、血流動態は其中でも重要な因子と考えられる。血流動態の解析には様々な手法があるが、各種の血管モデルを用いる血流解析は実験条件に大きく依存する。計算流体力学を用いる手法は仮定や境界条件等により解析結果が異なってくる。このため、生体において直接血流動態を測定することが望ましい。

頭蓋内の血流を直接解析する方法として、経頭蓋骨ドブラや二次元シネ位相コントラスト MRI がある。経頭蓋骨ドブラは、観察範囲に限られる、術者の技量に左右される、分解能が不十分などの欠点がある。二次元シネ位相コントラスト MRI は限られた断面での主幹動脈血流量測定にしか用いることができない。

Markl らは空間三次元と時間の計四次元の血流データを収集できる時間分解三次元位相コントラスト MRI を開発し、胸部大動脈の血流動態解析を行った。本研究では 4D-Flow と名づけられた本撮像法を用いて頭蓋内動脈血流動態可視化について検討した。

[方法]

1.5 T MR 装置を用い正常ボランティア 6 名の頭蓋内動脈を 4D-Flow で撮像した。3 軸全てに速度エンコードを行った。レトロスペクティブに心電図同期させ、1 心拍 20 相の三次元速度データを収集した。パラメータは TR/TE/NEX = 5.4/2.3/1, FA = 15, FOV = 16 cm, Matrix = 160 × 160, スライス厚 = 1 mm, スライス数 = 40, VENC = 60 cm/s, 撮像時間 = 30-40 分, slew rate = 120 mT/m/ms。得られたデータは流れ可視化ソフトウェア (EnSight) で処理した。

[結果]

血管の長軸に垂直な任意の断面から三次元流線を発生させることが可能であった。両側内頸動脈 C5 部から流線を発生させると、内頸動脈サイフォン部の血流を明瞭に描出することができた。両側内頸動脈 C2 部および脳底動脈から流線を発生させると、ウィリス輪を経て両側中大脳動脈 M2 部、両側前大脳動脈 A2 部、両側後大脳動脈 P3 部までの血流が描出された。

任意断面から粒子を発生させ追跡することや軌跡を流跡線として表現することも可能であった。内頸動脈 C5 部から粒子を発生させると、内頸動脈サイフォン部での粒子の通過が明瞭に描出された。これによると内頸動脈サイフォン部では血管内の流速は中心部で最速であり、血管壁に近くなるほど流速が低下し、血流が層流であることが示された。流跡線は、屈曲部の最速の血流は最大の曲率半径を通ることも示した。

頭蓋内血管の任意の二次元断面の経時的な速度ベクトル図が得られ、動脈瘤好発部である脳底動脈先端部や内頸動脈-後交通動脈分岐部についても描出可能であった。

最も速い血流は内頸動脈 C1-2 部において観察され、平均最高血流速度は 71.7 cm/s であった。

[考察]

本撮像法では頭蓋内主幹部から末梢までの動脈のデータを、1 mm の空間分解能、1 心拍 20 相の時間分解能で収集した。撮像時間は 30-40 分であり、臨床で許容される範囲内と考えられた。

4D-Flow の最大の利点は直接生体から生理的な状態で血流動態を測定できる点である。速度ベクトル図や流線、粒子追跡法により血流動態を可視化でき、古くから血管モデルを用いて行われてきたのと同様の血流動態の解析が直接生体で行うことが可能であることが示された。生きているヒトの頭蓋内血管血流動態を明瞭に描出した報告は初めてと思われる。血管モデルを用いる実験や計算流体力学の手法と比べて時間や費用を要さないことも大きな利点である。

空間分解能は 1 mm であるが、血管壁剪断応力計測のために壁近傍の速度を正確に求めるためには 0.5 mm 以下の空間分解能が必要である。高磁場装置、信号雑音比の高いコイルを使用すれば達成可能と考えられる。撮像時間も撮像法や撮像コイルの進歩により、さらに短縮することが可能である。一方、時間分解能は約 40-60 ms であり、すでに臨床応用には十分である。

本法を用いることで、正常血管のみならず病変血管の血流動態も解析されると期待される。速度情報を用いて剪断応力が得られれば、一見正常な脳血管の将来の病変の発生を推定できる可能性がある。

[結論]

4D-Flow は頭蓋内動脈の血流動態を速度ベクトル図、流線図、粒子追跡法にて可視化する非侵襲的で有用な方法と考えられた。

論文審査の結果の要旨

血管病変の発生・進行には血流動態が密接に関係していることが知られている。各個体の特徴などを考慮すると、生体において直接血流動態を測定することが望ましいが、従来用いられていた二次元シネ位相コントラスト MRI では不完全であった。共同研究者である Markl らは空間三次元と時間の計四次元の血流データを収集できる時間分解三次元位相コントラスト MRI を開発し 4D-Flow と名づけた。申請者らはこの 4D-Flow を用い、健常被験者における頭蓋内動脈の血流動態の可視化を試みた。

一般臨床用の 1.5 テスラの MRI 装置を用い文書による同意を得られた 6 名の健常被験者(男性 5 名、22-50 歳)において頭蓋内動脈の血流動態を 4D-Flow で撮像した。空間三方向全てに速度エンコード(VFNC)を行った。レトロスペクティブに心電図同期させ、一心拍 20 相の三次元速度データを収集した。パラメータは TR/TE/NEX = 5.4/2.3/1, FA = 15, FOV = 16 cm, Matrix = 160×160, スライス厚 = 1 mm, スライス数 = 40, VENC = 60 cm/s, 撮像時間 = 30-40 分, slew rate = 120 mT/m/ms。得られたデータは流れ可視化ソフトウェア(EnSight)で処理した。

血管の長軸に垂直な任意の断面から三次元流線(3D streamline)を発生させることが可能であった。内頸動脈中枢側 C5 から流線を発生させるとサイフォン部 C3 の血流が、さらに末梢側の C2 から発生させるとウィリス輪より末梢が描出された。任意の断面から粒子を発生させ追跡し(3D particle trace)その軌跡を流跡線(3D particle line)として表現することも可能であった。これらの結果によると内頸動脈サイフォン部では血管内の流速は中心部で速く、血管壁に近いほど遅く、屈曲部での最速血流は最大の曲率半径を通ることが示された。測定上の最速の血流は C1-2 部での 71.7 cm/s であった。

今回用いた 1 mm の空間分解能、一心拍 20 相の時間分解能では撮像時間は 30-40 分であり、臨床上許容範囲内と考えられる。しかしながら血管病変の発生に密接に関係する血管剪断応力を正確に求めるためには 0.5 mm 以下の空間分解能が要求される。今後、高磁場装置や S/N 比の高いコイルなど MRI 機器の改良、撮像法の工夫が研究されればさらに応用範囲が広がり、患者への負担も軽減され、情報の質も向上することが期待される。

審査委員会では、申請者らが 4D-Flow を用い、初めて生きているヒトの頭蓋内血管から生理的状态かつ非侵襲的に血流動態情報を取り出しビデオ映像で明瞭に示したことを高く評価した。本研究は新しい画像診断技術の提案であり健常被験者を対象としているが、今後様々な病態での応用研究の結果が期待される。検査時間が短縮されれば一般診療に広く応用可能となり、正常血管が病変を起こしてくる過程などが明らかになることが期待される画期的な方法と思われる。

- 1) 血圧と剪断応力の関係について
- 2) 剪断応力を感知する受容体は何か
- 3) 剪断応力の分布図を測定できるか
- 4) 石灰化病変でも測定可能か
- 5) 超音波で測定した流速と一致しているか
- 6) *in vitro* モデルと *in vivo* モデルの整合性について
- 7) 三次元流線と三次元流跡線が一致しないのはどのようなときか
- 8) どの程度の細さの血管まで測定可能か
- 9) 二次元速度ベクトル場を低く設定すれば静脈や乱流でも測定可能か

これらの質問に対し申請者の解答は適切であり、問題点も十分理解しており、博士（医学）の学位論文にふさわしいと審査員全員一致で評価した。

論文審査担当者	主査	難波 宏樹	
	副査	浦野 哲盟	海野 直樹