

論文の内容の要旨

論文題目 ヒト腹部大動脈分岐部における wall shear rate の MR velocity mapping によるベクトル解析

指導教官 豊岡照彦教授

東京大学大学院医学系研究科

平成 11 年 4 月入学

医学博士課程

内科学専攻

氏名 辻 多恵子

背景、目的

Wall shear stress は、粥状動脈硬化病変の発生に血行動態の面で関与すると考えられている。ヒトの動脈硬化病変は、wall shear stress の低いところに発生すると言われているが、最近の実験から、病変が好発する血管分岐部では、wall shear stress が低いだけでなく、血流の停滞、剥離、乱流が生じ、shear stress の方向や強さが、時間的、空間的に不安定であることもわかってきている。

Wall shear rate とは、血流速度勾配であり、血管壁からの垂直距離方向への速度勾配で表わされ、Wall shear stress は、wall shear rate と血液粘性の積である。

動脈硬化病変の好発部位である血管分岐部の血管壁では、複雑な血行動態が予想され、生体内の wall shear rate を正確に評価するには血流の三次元的把握が不可欠である。MR 速度マッピングを用いれば、いかなる血流速度ベクトルも互いに直交する 3 方向の血流ベクトルの和として表わせる。

今回の研究では、この MR 速度マッピングを用い、腹部大動脈の分岐部における wall shear rate を三次元的に評価し、血管分岐部における wall shear rate の正確な評価と、wall shear rate と血管分岐部の解剖学的構造との関連について検討した。

対象と方法

対象と MR imaging technique

対象は、検査の説明により同意が得られた、7 例の健康男子成人で、平均年齢は 28.4 ± 10.0 歳であった。全例無症状で、血圧は正常範囲内であった。また、心疾患の既往はなく、心電図は正常範囲内であった。

Wall shear rate を計測するために用いた MR imager は、Magnetom Vision であり、撮影条件は、TR/TE = 80/6 ms、フリップ角 30° とした。撮像方法は、非呼吸止め MR 速度マッピングを用いた。ピクセルごとの血流速度ベクトルを三次元的に把握するため、3つの互いに直交する方向、- 撮像断面に垂直な方向 (through-plane)、撮像断面上で直交する2方向 (右から左方向の in-plane と頭側から尾側方向の in-plane) - の速度ベクトルを3回のマッピングにより求めた。撮像断面は、腹部大動脈血管分岐部とし、腹部大動脈と左右の総腸骨動脈の分岐で形成される角度を A (<90°) とした。

Wall shear rate の計測

Wall shear rate の計測は、8時相 (心電図 R 波より 0 msec, 80 msec, 160 msec, 240 msec, 320 msec, 400 msec, 480 msec, 560 msec) で行なった。計測した解剖部位は、腹部大動脈からの分岐直後の左右総腸骨動脈、それぞれ内側と外側につき計 4箇所 の血管壁近傍とした。

Wall shear rate を三次元的にベクトル解析するために、血流速度ベクトルを axial component, nonaxial component, normal component の3方向へ分解した。Wall shear stress の形成には、axial component と nonaxial component の2つの血流速度ベクトルが関与するため、axial component $\{(wall\ shear\ rate)_{axial}\}$ と nonaxial component $\{(wall\ shear\ rate)_{nonaxial}\}$ の2つのベクトルを求めた。

3回のマッピングにより得られた互いに直交する3方向の血流速度ベクトル ($V_{right-left}$, $V_{head-caudal}$, $V_{perpendicular}$) のうち、 $(wall\ shear\ rate)_{axial}$ は $V_{right-left}$ と $V_{head-caudal}$ の2方向のベクトルが、 $(wall\ shear\ rate)_{nonaxial}$ は $V_{perpendicular}$ の1ベクトルが関与するため、2つの component は次式で表わされた。

右の総腸骨動脈に関しては

$$(wall\ shear\ rate)_{axial} = 4096/D \times \{150 \times \cos A \times (I2 - I1)_{head-caudal} - 75 \times \sin A \times (I2 - I1)_{right-left}\}$$

左の総腸骨動脈に関しては

$$(wall\ shear\ rate)_{axial} = 4096/D \times \{150 \times \cos A \times (I2 - I1)_{head-caudal} + 75 \times \sin A \times (I2 - I1)_{right-left}\}$$

nonaxial component の場合は、左右の総腸骨動脈共通となり

$$(wall\ shear\ rate)_{nonaxial} = 75/4096/D \times \sin A \times (I2 - I1)_{perpendicular}$$

ここで、A は腹部大動脈からの左右総腸骨動脈の分岐角度、V1 は血流速度 - 距

離関係曲線上の血管壁に最も近いピクセルの持つ速度、V2は血管壁に2番目に近いピクセルの持つ速度、Dはピクセルの大きさ、I1は血管壁に最も近いピクセルの信号強度、I2は血管壁に二番目に近いピクセルの信号強度とした。

Wall shear rate 計測の再現性

Wall shear rate 計測の再現性は、任意の5例における4心時相につき、右の総腸骨動脈の内側壁と外側壁における計40回の計測を、同一検者が2回計測を繰り返すことにより得た対をなす2計測値の差の絶対値を両者の平均値で除して表現した。

Wall shear rate の分析

Peak wall shear rate は、収縮期から拡張期に至る8心時相の各時点で得られた値のうち、絶対値が最大のもので定義した。Axial component と nonaxial component のそれぞれに対し、peak wall shear rate を算出した。

Wall shear rate の変動の程度を示す指標である oscillatory shear index は、axial component と nonaxial component につき以下の通り定義した。

$$(\text{oscillatory shear index}) = |A_{\text{recessive}}| / (|A_{\text{dominant}}| + |A_{\text{recessive}}|)$$

ここで、 $|A_{\text{dominant}}|$ は、wall shear rate - 時間曲線下の順行方向の流れにより惹起された正の値の和とし、 $|A_{\text{recessive}}|$ は、同曲線下の逆行方向の流れにより惹起された負の値を取った wall shear rate の絶対値の和とした。

腹部大動脈が総腸骨動脈に分岐する角度 A に注目し、(peak wall shear rate)_{axial} および (oscillatory wall shear rate)_{axial} との相関を求めた。

結果

計測の再現性

Wall shear rate 計測の再現性は、内側壁で $10.4\% \pm 10.1\%$ であり、外側壁で $10.1\% \pm 8.9\%$ であった。全体としての再現性は、 $10.3\% \pm 9.5\%$ であった。

内側壁と外側壁の比較

Axial component の peak wall shear rate は、内側壁で $196.0 \pm 53.7 \text{ sec}^{-1}$ 、外側壁で $120.6 \pm 37.2 \text{ sec}^{-1}$ であり、内側で有意に大きかった ($p < 0.01$)。Nonaxial component の peak wall shear rate は、内側壁で $27.8 \pm 9.6 \text{ sec}^{-1}$ 、外側壁で $26.4 \pm 16.2 \text{ sec}^{-1}$ と両者に差は認めなかった。

Axial component の oscillatory shear index は、内側壁で 0.15 ± 0.08 、外側壁で 0.24 ± 0.11 であり、内側で有意に小さかった ($p < 0.01$)。Nonaxial component の oscillatory shear index は、内側壁で 0.55 ± 0.31 、外側壁で 0.52 ± 0.40 と両者に差は認めなかった。

血管の分岐角度と wall shear rate の関係

腹部大動脈から右の総腸骨動脈が分岐する角度は $26.7 \pm 9.5^\circ$ 、左の総腸骨動脈が分岐する角度は $15.6 \pm 8.1^\circ$ であり、右で大きかった ($p < 0.01$)。外側壁では、分岐角度は、(peak wall shear rate)_{axial} と正相関し ($r = 0.577, p < 0.05$)、(oscillatory wall shear rate)_{axial} とは逆相関を呈した ($r = -0.603, p < 0.05$) が、内側壁に関しては、相関は認められなかった。 ($p = 0.92$) ($p = 0.11$)

考察

MR 速度マッピングによる wall shear rate のベクトル解析

Wall shear rate を求めるためには血管壁のごく近くの血流速度を評価する必要があるが、血管壁近傍における血流速度の測定は大変困難である。MR 速度マッピングは、3方向のベクトルを設定することにより、どのような複雑な流れをとる血流速度により惹起される wall shear rate をも三次元的に把握できた。

今回の研究で計測された wall shear rate を考察してみると、分岐した血管の外側壁で測定された wall shear rate が、有意に小さく、変動性が大きかった。このことは、分岐後血管の外側壁は、動脈硬化発症の危険性が高いことを示している。さらに、分岐する血管の分岐角度と wall shear rate の関係を考察してみると、外側壁では、分岐角度は wall shear rate に正の相関をしており、変動性に負の相関をしている。つまり、分岐角度が小さい血管で、wall shear rate が小さく、変動性が大きかった。このことは、分岐後血管の外側壁では、分岐の角度が小さいと動脈硬化発症の危険性が高いことを示している。