

学位論文題名

Pre-Saturation 法を利用した MRI による血流測定

学位論文内容の要旨

【目的】

血流の正確な評価は血行動態の検討に重要な情報を与えるが、現在広く行われている超音波ドプラ法では速度分布 (velocity profile) の評価はなされていない。MRIによる流速測定法の中で time-of-flight効果を用いる方法は、傾斜磁場の急激な切り換えが引き起こす渦電流、化学シフト、磁場の不均一さの影響を受けにくいという利点がある。加えて pre-saturation法を用いた方法は普及型の器械で比較的簡単に施行でき、かつ直接管腔内の velocity profile が観察でき、臨床にも応用しやすい方法である。しかしフィルムや cathode-ray tube (CRT) 上で手動的に評価を行なうと誤差が大きく正確な測定ができない。このような誤差を排除するため、画像管理システム (PACS) のネットワークを介して直接デジタルデータを転送し、パーソナルコンピュータ上で客観的に評価するためのファントム実験を行い、さらに本法を門脈血流を対象に臨床応用を試みた。

【方法】

(1) 原理: pre-saturation法は元来、流体のアーチファクト軽減の為に考案された方法でスピネコー法では血流信号を落とすために使われている。この pre-saturationの幅を極く狭くして印加することで画像に標識 (pre-saturation band、以下PSB) がつけられ、一定時間をおいて撮像を行うと動体の部分ではこの標識の移動が観察できる。(2) 装置: 使用機種はSIEMENS社製 MAGNETOM H15 (1.5 T) でパルスシーケンスは 2D FLASH (fast low angle shot) に 4mm のPSBを用いた。TR 100msec TE 12msec FA 30°、スライス厚 10mm、撮影時間は pre-scan時間を含め15.6秒である。(3) ファントム実験: circular polarization型頭部用コイルを使用した。定常流体モデルは内径1cmのガラス管に人工血液を流し、メスシリンダーで流量を実測した。流量は 0.33ml/min から 1.86ml/min まで12段階に変

化させ、PSBを印加してから画像信号を得るまでの時間は20msecとした。今回使用したパルスシーケンスではPSBを印加する基本画像を3次元的に傾けることができないので、ガラス管とスライス方向の傾きに対する補正の検討も行なった。(4)臨床応用：対象は男性健常者11名で平均年齢 29.8 ± 6.4 才、平均体重 62.4 ± 6.1 kgであった。全身用コイルを使用し、測定は安静空腹時に行なった。ファントム実験の結果と門脈の血流速度を考慮し、PSB印加から信号を得るまでの時間は50msecに設定した。門脈の冠状断像を撮影し門脈に垂直な方向のPSBを印加した。撮影は息止め下で行ない、ひとりに3回ずつ行なった。またPSBと同じ断面、および門脈に沿った断面の撮影も行ない門脈の断面積およびスライス方向に対する角度を求めた。(5)超音波ドプラ法による測定：超音波ドプラ法にてMRIと同様の位置で門脈の最高流速の測定を行なった。使用機種は東芝SSA-100Aで3.5MHzセクタプローベを用い各症例3回ずつ測定した。(6)流量計算方法：画像データはPACSのネットワークを介して取得し、パーソナルコンピューター(PC98:NEC)上で独自に開発したソフトにより処理を行なった。流れの方向に沿った各直線上の信号輝度(signal intensity)の最小点を求めることで管腔内のvelocity profileが得られる。この移動距離を所要時間で割ることで流速が得られ、積分し円錐体または楕円錐体近似することにより流量を計算した。またこのprofileの中で最も移動距離の大きい点の流速を最高流速とした。

【結果】

(1)ファントム実験：実測値(y)とpre-saturation法によって求めた値(x)との間には相関係数 $r^2=0.984$ 、 $P<0.001$ の良好な一次相関が得られた($y=0.11+0.90x$)。またガラス管のスライス方向に対する傾き(θ)が増すと、流量は減少する傾向にあり θ が 20° を越えると減少が明かとなり 37° で最大14.5%の誤差を示した。傾きに対する補正を $\cos \theta$ で除することで誤差は7.1%に減少した。(2)臨床応用：門脈血流は全例で測定可能であった。ファントム実験で得られた相関式はy切片が0に近く、傾きが1に近いので臨床例の評価においても修正を行なう必要はないと考え、計算により得られた値をそのまま流量とした。また門脈のスライスに対する角度(θ)は $12.5 \pm 7.4^\circ$ でファントム実験の結果から門脈の傾きに対する補正が必要と考え $\cos \theta$ で除することで補正した。pre-saturation法によって求められた最高流速は 20.1 ± 4.5 cm/sec、流量は 16.2 ± 5.0 ml/min/kg body weightであり、各症例の3回の測定における標準偏差の平均は 2.65 ± 1.81 cm/secであった。同時に行なった超音波検査で適当な値

が得られた9例から求めた最高流速の平均は 17.8 ± 4.4 で各症例の3回の測定における標準偏差の平均は $1.59 \pm 0.83 \text{ cm/sec}$ であった。pre-saturation法により求めた値との相関は $r^2=0.529$ 、 $p<0.05$ の有意な相関を示した。

【考察】

血管など管腔内の流体を評価する場合、その velocity profile を考慮した評価が必要であるが、現在広く行なわれている超音波ドプラ法による測定ではこれが全くなされていない。このため適当な角度が得られた場合でも最高流速の評価は行なっても平均流速や血流量の評価には適さない。PSBを用いた流速測定でも中心部の最高流速のみを検討した報告が多くprofileを検討した報告はみあたらない。これは臨床的には鮮明なprofileが得にくくフィルムやCRT上で手動的にその評価を行なうのは困難なためと考えられる。今回、PACSのネットワークを介することで画像のデジタルデータの取得が容易となり、また直接コンピュータ上で解析することによって処理が自動化され手動による人的な誤差の排除が可能となった。

ファントム実験における相関は非常に良好であり、臨床例においてもこれまでの報告とも非常に近い値を示した。傾きに対する補正に対してはファントム実験でも 20° 前後から誤差が大きくなり精度を落とす原因となっており、補正を行なう方が正確であろう。門脈血流はピーク Reynolds 数が約300とされ通常は層流と考えられているが今回正常例でも必ずしも層流を示す放物線になっていない例も多くみられた。肝硬変やうっ血肝では門脈の速度分布に変化が起る可能性があり血流の評価には速度分布を用いた評価が不可欠である。また速度分布は血行動態における重要な情報でありその定性的な評価も有用で今後の応用が期待される。

今回の方法では管腔内の一断面のみを利用して楕円錐体近似で流速を求めており、これが誤差の原因となっている可能性がある。撮影の高速化がはかられ管腔全体の3次元的なデータ採集ができればより正確な評価が可能となるであろう。またPACSを介してデジタルデータを容易に取得、処理できる点は大きな利点であり今後、各方面での画像データの定量的、定性的評価における利用が期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 宮 坂 和 男

副 査 教 授 井 上 芳 郎

副 査 教 授 川 上 義 和

学位論文題名

Pre-Saturation 法を利用した MRI による血流測定

【目的】

MR血管撮影にpre-saturation法を併用して血流測定を試み、門脈を対象に臨床応用の可能性を検討する。

【方法】

(1) 原理: time-of-flight法によるMR画像にpre-saturationの幅を極く狭くして印加することで画像に標識 (pre-saturation band、以下PSB) がつけられ一定時間において撮像を行うと動体の部分ではこの標識の移動が観察できる。(2) 装置: 使用機種はSIEMENS社製 MAGNETOM H15 (1.5T)でパルスシーケンスは 2D FLASH に 4mmのPSBを用いた。撮影時間はpre-scan時間を含め15.6秒である。(3)ファントム実験: 定常流体モデルは内径1cmのガラス管に人工血液を流し、メスシリンダーで流量を実測した。またガラス管とスライス方向の傾きに対する補正の検討も行なった。(4)臨床応用: 対象は男性健常者11名で、測定は安静空腹時に行なった。撮影は息止め下で行ない、ひとりに3回ずつ行なった。また超音波ドプラ法にてMRIと同様の位置で門脈の最高流速の測定を行なった。(5) 流量計算方法: 画像のデータはPACSのネットワークを介して取得し、パーソナルコンピュータ上で独自に開発したソフトウェアにより処理を行なった。流れの方向に沿った各直線上の信号強度の最小点を求めることで管腔内のvelocity profileが得られる。これを所要時間で割ることで流速が得られ、積分し円錐体または楕円錐体近似することにより流量を計算した。

【結果】

(1) ファントム実験: 実測値(y)とpre-saturation法によって求めた値(x)の間には相関係数 $r^2=0.984$ 、 $P<0.001$ の良好な一次相関が得られた。またガラス管のスライス方向に対する傾き(θ)が増すと、流量は減少する傾向にあり、傾きに対する補正を $\cos \theta$ で除することで誤差は減少した。(2) 臨床応用: 門脈血流は全例で測定可能であった。pre-saturation法によって求められた最高流速は $20.1 \pm 4.5 \text{ cm/sec}$ 、流量は $16.2 \pm 5.0 \text{ ml/min/kg body weight}$ であった。最高流速において同時に行なった超音波検査との相関は $r^2=0.529$ 、 $p<0.05$ の有意な相関を示した。

【考察】

管腔内の流体を評価する場合、そのvelocity profileを考慮した評価が必要であるが、PSBを用いた流速測定でもprofileを検討した報告はみあたらない。これ

は臨床的には鮮明なprofileが得にくくフィルムやcathode-ray tube上でその評価を行なうのは困難なためと考えられる。今回、PACSのネットワークを介することで画像のデジタルデータの取得が容易となり、また直接コンピューター上で解析することによって処理が自動化され人的な誤差の排除が可能であった。ファントム実験における相関は非常に良好であり、臨床例でもこれまでの報告とも非常に近い値を示した。門脈血流はピークReynolds数が約300とされ通常は層流と考えられているが今回、正常例でも必ずしも層流を示す放物線になっていない例もみられた。肝硬変やうっ血肝では門脈の速度分布に変化が起る可能性があり血流の評価には速度分布を用いた評価が不可欠である。また速度分布は血行動態における重要な情報でありその定性的な評価も有用で今後の応用が期待される。

口頭発表時および個別審査において井上教授から臨床応用する際に門脈を選択した理由、動脈や細い静脈、例えば硬膜静脈等に応用可能かという質問がでた。これに対し現段階では撮影に15.6秒要するため拍動性の血流は測定できず定常流である門脈を選択したこと、現在の時間・空間分解能からは1cm程度の太さが望ましいが、今後の技術開発により拍動性の血流やより細い血管にも原理的には応用可能であると解答した。さらに川上教授から呼吸の影響の有無、安静呼吸下での測定は可能性、超音波検査との比較で血流が速い部より中等度の速度の部での誤差が大きい理由を問われた。これに対し撮影は息止め下で行なっており呼吸の影響はないこと、撮影時間が長いため安静呼吸下では鮮明な画像が得られないこと、超音波検査の値にも誤差が大きいため症例が少ないため両者の比較が困難であることを解答した。副査の井上、川上両教授にはそれぞれ個別に面談し、試問の結果両教授の判定は合格であった。

以上、pre-saturation法を利用して血流測定を試みた本研究は独創性に富み、博士（医学）の学位に値するものと判断した。