

速度情報を付加したターボフラッシュ法による流速測定

田村 元¹, 高橋昭喜¹, 日向野修一¹, 栗原紀子¹,
古田 進¹, 石橋忠司¹, 丸岡 伸¹, 山田章吾¹,
滝沢 修²

¹東北大学医学部放射線科 ²シーメンス旭メディテック

とが、実際に可能かどうか検討を行い、良好な結果を得たので報告する。

はじめに

Phase contrast 法を用いた流速の測定は、通常、RF pulse の後、信号採取の前に velocity encoding 用傾斜磁場をかけることによって行われる。このため、エコー時間は長くなり、さらに心電同期をかけることも多く、検査時間が長くなる。また、適当な encoding velocity (Venc) をあらかじめ知っておく必要性もある。

体の動きが問題となる部位では、出来るだけ短時間で、撮像を終わらせること、特に、胸腹部では、呼吸停止下での信号採取が望ましい。

ターボフラッシュ (Turbo-FLASH=snapshot FLASH=short TR gradient echo) 法の前処理に、速度情報付加用のパルス列、「 90°_x RF パルス-傾斜磁場- 180°_y RF パルス-傾斜磁場- 90°_y RF パルス」を用いることで、原理的には縦磁化に流れの情報を乗せることが出来る^{1),2)}。この方法では、一回の撮像時間は、1~2 秒である。この程度の時間であれば、呼吸停止が可能であるし、また、試し撮りをして、適当な Venc を見つけることが可能と思われる。

今回、この方法を応用して流速を測定するこ

方 法

点滴セットを用いて、水がチューブ(内直径:

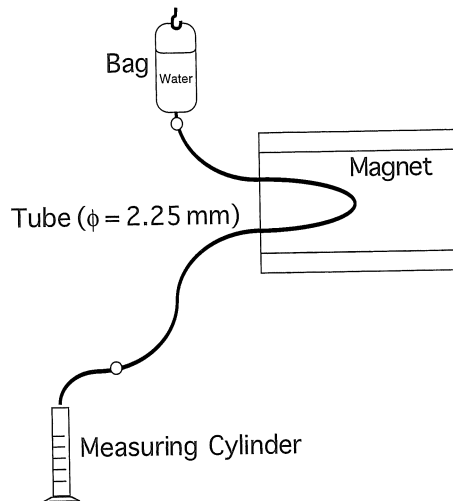


Fig. 1. A flow phantom consisted of a bag and a tube for intravenous drip. The reservoir bag was filled with water and was hung up with a hook on the MR apparatus. The mean inner diameter of the tube was 2.25 mm. The volume of the water flowed out in a unit time was measured with a measuring cylinder.

キーワード flow velocity, velocity-encoding, snapshot FLASH, MRI

2.25 mm) 内を流れるファントムを作成した。平均流速は、一定時間流れ出る水量を測定して求めた (Fig. 1)。点滴の速度を変えて、10回の測定を行った。平均流速は 1-32 cm/s の範囲であった。流速が 40 cm/s としても、レイノルズ数は高々 1000 であり、層流と考えられた。

使用機種はシーメンス社製 Magnetom Vision (1.5 T). head coil を使用した。

Turbo-FLASH シークエンス (centric phase reordering, TR/TE=11/4 ms) の前に、速度情報付加用のパルス列をつけ加えて、Fig. 2 に示される、パルスシーケンスを作成した。centric phase reordering では、準備された縦磁化成分が負の場合に、画像の ghost が強い。しかし、 $90^\circ_x-180^\circ_y-90^\circ_y$ の後の正の縦磁化成分は、 B_0, B_1 field の不均一性の影響を強く受けるので、一度負の縦磁化成分を作ってから正にすることを考え、composite 180° パルスをつけ加えた。これにより、 T_1 緩和の差も、ある程度補正されることになる。

フリップ角 15 度、スライス厚 7 mm, matrix

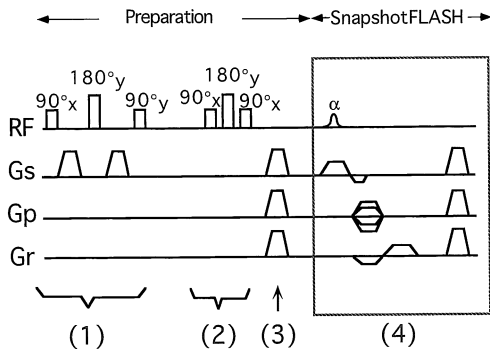


Fig. 2. Pulse Scheme. 1) Velocity-encoding pulse train. Nonsselective rectangular radiofrequency (RF) pulses were used. 2) Composite 180° RF pulse in order to reverse longitudinal components of magnetization. 3) Spoiler gradient. 4) Snapshot FLASH sequence with centric phase reordering.

= 128×256 , FOV = 250 mm の条件で撮像した。付加パルス列内の RF pulse は、スライス非選択性とした。撮像面は流れに垂直にした。

撮像面と垂直方向に速度情報付加用傾斜磁場をかけた。その Venc の大きさを、2-200 cm/s の範囲で、10 ないし 11 段階ほど変化させて撮像し、チューブの断面部全体に関心領域をとり、信号強度を測定した。以下に示すような、層流を仮定した信号強度式を、得られた信号強度に curve fitting させて流速を求めた。

「 90°_x -傾斜磁場- 180°_y -傾斜磁場- 90°_y 」パルス列後に期待される縦磁化の計算

速度 v を持つスピンの位相 $\phi(v)$ は、最後の 90 度パルスの直前で

$$\phi(v) = -\gamma v g_1 (t_{\text{tramp}} + t_1) (t_d + 2t_{\text{tramp}} + t_1)$$

となる。ここで、 γ は磁気回転比、 g_1 は速度情報付加用傾斜磁場の大きさ、 t_{tramp} は傾斜磁場の立ち上がり時間、 t_1 は傾斜磁場が一定となっている時間、 t_d は二つの傾斜磁場の間隔である (Fig. 3)。最後の 90 度パルス直後に現れる縦磁化成分は、パルスの直前の横磁化成分 $\exp\{i\phi(v)\}$ (i は虚数単位) の虚数成分、すなわち $\sin \phi(v)$ に比例することになる。

円筒形の層流を仮定すると、その内部の速度分布は $v(r) = v_m [1 - (r/a)^2]$ と表せる。ここで v_m は最大速度、 a は円筒形の流れの半径、 r は流れの中心からの距離である。この速度分布の平均流速は $1/2 v_m$ となる。

スピンはこの速度分布に対応する位相分布をする。それらが最後の 90 度パルスを受けるので、最後に現れる縦磁化成分の平均値は、 90°_y パルスの直前の個々の横磁化成分 $\exp\{i\phi(v)\}$ を積分して得られる、

$$i\pi a^2 [1 - \exp\{i\phi(v_m)\}] / \phi(v_m)$$

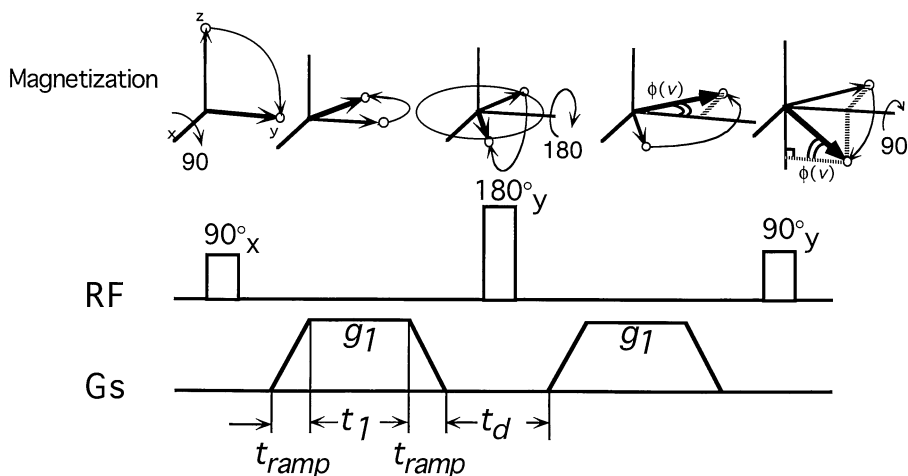


Fig. 3. Precession of magnetization in response to 90°_x -Gs- 180°_y -Gs- 90°_y pulse train. The first 90°_x pulse tips spins to y axis. After the velocity encoding gradients and refocusing 180°_y pulse, Gs- 180°_y -Gs, spins have phases, $\phi(v) = -\gamma v g_1 (t_{ramp} + t_1) (t_d + 2t_{ramp} + t_1)$, in the transverse plane in proportion to their velocities, v (γ , gyromagnetic ratio; g_1 , magnitude of velocity encoding gradient; t_{ramp} , ramp time; t_1 , plateau time; t_d , interval between two gradient pulses). The last 90°_y pulse tips spins into the y-z plane where they have longitudinal components of magnetization proportional to $-\sin \{\phi(v)\}$.

の虚数成分すなわち

$$\pi a^2 \{1 - \cos \phi(v_m)\} / \phi(v_m)$$

に比例することになる。

V_{enc} の大きさをいくつか変化させて測定された信号強度に対して、最小二乗法を用いて回帰曲線を求めた。そのときのモデルは、 $p_1 [1 - \cos \{\phi(v_m) + p_2\}] / \{\phi(v_m) + p_2\}$ で、パラメーターは、 p_1 , p_2 , そして v_m である。磁場の不均一性等の影響を、位相のずれ p_2 として考慮に入れた。求められた v_m の半分を平均流速とした。

結 果

前処理パルスの V_{enc} の値に応じて変化する信号を得た。流速が速くなると、画像のボケが生じた (Fig. 4)。

V_{enc} の大きさを変化させて得られた信号強度をプロットしたものの一例を Fig. 5 に示す。

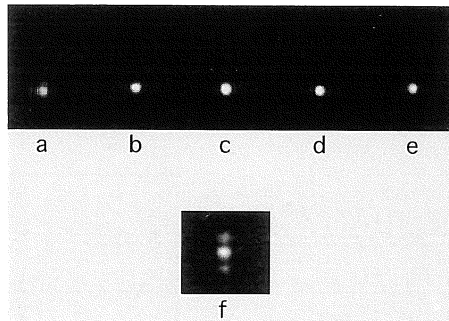


Fig. 4. Images of flowing water through a tube. Encoding velocity (V_{enc} : the velocity in which a phase shift of flowing spin equals to 180°) was 12 cm/s (a), 16 cm/s (b), 30 cm/s (c), 40 cm/s (d), and 60 cm/s (e), respectively. Mean velocity measured from outflow rate was 7.1 cm/s in these cases. (f) An image with the flow velocity of 32 cm/s ($V_{enc} = 100$ cm/s). A ghost artifact was seen on the image.

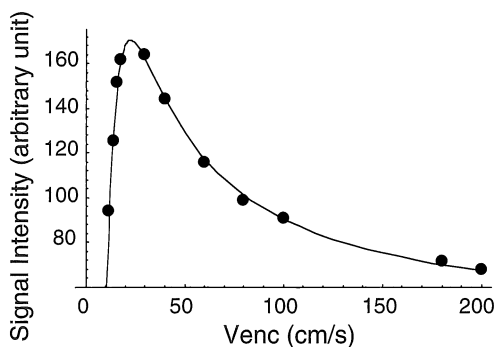


Fig. 5. Flow signal intensity averaged over cross section of tube versus Venc of the velocity-encoding pulse sequence. Solid line shows a fitted curve based on a mathematical model on the assumption of a laminar flow, $\pi a^2 \{1 - \cos \phi(v_m)\} / \phi(v_m)$, where a is the radius of the tube and v_m is the maximum velocity in the flow. Mean flow velocity was 7.1 cm/s.

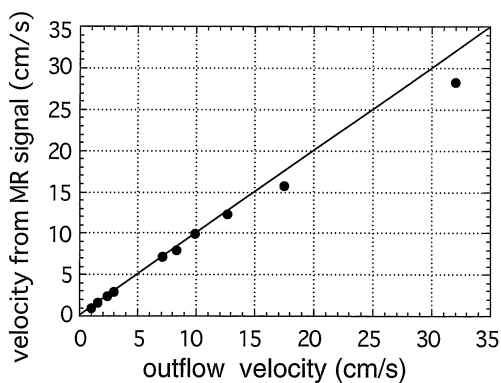


Fig. 6. Mean flow velocities derived from MR signal intensity versus those from outflow rate.

それに対して最小二乗法を用いて得られた回帰曲線を、同じ Fig. 5 に曲線として示してある。理論曲線は実測値とよく一致している。

「信号強度から計算された速さ」と「流出量から求めた速さ」との相関は良好で、流速が遅い場合 ($v_m < 30$ cm/sec) には、信号強度から計算される平均流速は、測定した平均流速とほぼ一致した (Fig. 6)。

考 察

遅い流れであれば、本法により求められた速度は、実際の流出量から求めた速度とよく一致し、実用可能と考えられた。臨床的には、静脈や脳脊髄液などに適用可能と考えられる。勿論、それらの流れは、層流ではないため、平均流速と対比させることは出来ない。しかし、ピクセルごとの流速を近似的に求めることは可能と考える。

一回の撮像時間は短い、速度情報付加用傾斜磁場の大きさを変えて、数回撮らないと流速が求められないのが欠点と思われる。また、流れの向きに関しても、スライスの手前に向かっての向きか向こうの向きか予め判断しておく必要がある。

流れが速い場合には、1秒ほどの撮像時間の間に上流の縦磁化の違ったスピンの撮像面内に流れ込み、画像のボケを作ると考えられる。従って、流速の速い動脈には、適応できない。マトリックスを減らすことにより、ある程度は、高速流にも対応できると思われるが、細い血管は描出できなくなる。エコープラナー法 (EPI) を用いればこの難点は解決されるものと考えられるが、それについては、Guilfoyle 等³⁾が検討している。しかし、EPIでは、磁場の不均一性による画像の歪みや、スライス方向に制限がある等の欠点があり、多くの臨床機で使用可能な本法の臨床応用が期待される。

この方法では、静止スピンの信号が抑えられるため、MR venography 等への応用も期待できるので、今後検討していきたい。

なお、本論文の要旨は、第24回日本磁気共鳴医学会大会 (1996年9月) で発表した。

文 献

- 1) Korosec FR, Grist TM, Polzin JA, Weber DM, Mistretta CA: MR angiography using velocity-selective preparation pulses and segmented

- gradient-echo acquisition. Magn Reson Med 1993 ; 30 : 704-714
- 2) Haase A : Snapshot FLASH MRI. Applications to T₁, T₂, and chemical-shift imaging. Magn Reson Med 1990 ; 13 : 77-89
- 3) Guilfoyle DN, Gibbs P, Ordidge RJ, Mansfield P : Real-time flow measurements using echo-planar imaging. Magn Reson Med 1991 ; 18 : 1-8

Flow Measurements Using a Turbo-FLASH Sequence with a Velocity-Encoding Pulse Train

Hajime TAMURA¹, Shoki TAKAHASHI¹, Shuichi HIGANO¹,
Noriko KURIHARA¹, Susumu FURUTA¹, Tadashi ISHIBASHI¹,
Shin MARUOKA¹, Shogo YAMADA¹, Osamu TAKIZAWA²

¹*Department of Radiology, Tohoku University School of Medicine
1-1 Seiryomachi, Aoba-ku, Sendai 980-77*

²*Siemens-Asahi Medical Technologies, Ltd.*

Background : Ordinary phase-contrast techniques in MRI for velocity quantification requires long data measurement times in order to acquire images. A snapshot FLASH sequence with velocity-encoding pulses was evaluated for velocity measurement utilizing a specifically designed phantom.

Methods : A velocity-encoding ($90^\circ_x\text{-}G_s\text{-}180^\circ_y\text{-}G_s\text{-}90^\circ_y$) pulse train was added prior to a standard Turbo-FLASH sequence with centric phase reordering where G_s is a velocity-encoding gradient. Water flow through a tube ($\Phi=2.25$ mm) was imaged with this sequence implemented on a 1.5 T MR unit. Flow signal intensities were acquired with several magnitudes of the velocity-encoding gradient. A mathematical model in which flow was considered to be laminar was fitted to these data and the flow velocity was obtained from a parameter of the model.

Results : The measurement time for a single image was about 2 seconds. In order to calculate velocity, several images had to be acquired. When the maximum flow velocity in the tube was less than 30 cm/sec, calculated velocities were in good agreement with mean flow velocities obtained from outflow rates and the cross-sectional area of the tube. Above that velocity, a ghost artifact appeared on the image.

Conclusions : Turbo-FLASH sequence with a velocity-encoding pulse train is an efficient means for measuring the velocity of slow flow rates in a short time.