

Single-shot turbo spin-echo を用いた頸部 MR myelography の基礎的検討

田 淵 隆¹, 清野 隆¹, 熊代正行¹, 中田和明¹,
香川芳徳¹, 光井英樹¹, 佐々木二梅恵¹, 道家雅子²,
渡辺祐司²

¹倉敷中央病院放射線センター ²同放射線科

緒 言

X線 myelography は、X線の透過率の差を利用しているため、脊髓腔を描写するには十分な濃度の造影剤が必要である。しかし、頸部の脊髓腔は腰部に比べて狭く、脳脊髄液には拍動流があり、通常は腰部より造影剤を注入するために希釈され、十分な造影剤濃度を保つことは容易ではない。また、頸椎よりも下部に完全ブロックを有する場合、腰椎穿刺によって頸部の myelography を得ることは不可能である。更に、X線 myelography は必ずしも安全な検査法ではなく、腰椎穿刺や造影剤の注入に伴う副作用や、検査後の癒着性くも膜炎の報告もある^{1),2)}。

MR myelography は、強い T₂ 強調像を用いて脳脊髄液によって満たされたクモ膜下腔を選択的に画像化する手法である。X線 myelography とは異なり、造影剤を用いる必要はなく、非侵襲的で安全な検査法である。これまで、主として腰部を中心に multi-slice 法や single-slice 法の MR myelography が報告されているが、頸部の MR myelography は、脊髓腔が狭く、また、体動、脳脊髄液の流れ等に起因するアーチファクトが画像を劣化させるため、

腰部の MR myelography に比べ、良好な画像を得るのは困難であった^{3),4)}。

そこで、今回我々は、この頸部の MR myelography の撮像に短時間で非常に強い T₂ 強調像を得ることができる single-shot turbo spin-echo (TSE) 法を用い、ファントムおよび健常ボランティアによる single-slice MR myelography の最適撮像条件の検討を行ったので報告する。

方 法

Single-slice 頸部 MR myelography に用いたパルスシーケンスは、エコートレイン数 (ETL : echo train length) を 256 に設定した single-shot TSE 法である。一回の励起で得られるエコーデータを k 空間の辺縁 (高周波数領域) から線形に配置し、非常に長い実効エコー時間 (TE) を設定する。このパルスシーケンスをもとにして、

- 1) ファントムを用いた撮像条件の検討
- 2) 健常ボランティアによる撮像条件の検討を行った。

使用装置は、1.5T 超伝導 MR 装置 (Philips 社製 Gyroscan ACS-NT/傾斜磁場強度 15

キーワード MR myelography, single-shot TSE, heavily T₂-weighted image

Table 1. Imaging Parameters for Phantom and Volunteer Studies

	phantom study a	phantom study b	phantom study c	volunteer study
FOV (mm)	250	250	250	250
matrix	256×256	256×256	256×256	256×256
TR (ms)	10000	3000-10000	8000	8000
TEeff (ms)	200-1600	1300	1300	1400
slice thickness (mm)	10	10	10	40-60
NSA	2	2	1-5	1-4
ETL	7	256	256	256
Coil	body coil	body coil	body coil	neck coil

mT/m), 受信用コイルとして, ファントムの撮像にはボディコイルを, ボランティアの撮像には頸部専用コイルを用いた.

1) ファントムを用いた撮像条件の検討

測定用ファントムはアクリル製円形ファントム (京都科学) を使用し, 試料として生理食塩水 (T_1 値 3650 ms, T_2 値 2035 ms), ベビーオイル (T_1 値 186 ms, T_2 値 54 ms) を用い, ファントム内を塩化ニッケル水溶液 (10 mmol/l, T_1 値 170 ms, T_2 値 155 ms) で満たした. これらの各 T_1 , T_2 値は, パルス法で算出した.

Table 1 に各ファントム実験 a, b, c のパラメータを示す. ここでいう TR は加算を行う場合の繰り返し時間とし, 装置の送受信ゲインは自動設定とした. また, 検討に用いた信号強度・ノイズ比 (SNR) およびコントラストは, 以下の式で算出した.

$$\text{SNR} = \frac{\text{各試料の信号強度}}{\text{バックグラウンドの標準偏差}}$$

$$\text{コントラスト} = \frac{\text{生理食塩水の信号強度}}{\text{塩化ニッケル水溶液の信号強度}}$$

a) 実効 TE と各試料の SNR とコントラスト

実効 TE を 200 ms から 1600 ms に変化させて生理食塩水, ベビーオイル, 塩化ニッケル水溶液を撮像し, SNR およびコントラストを算

出した. TR を 10000 ms, 加算回数は 2 回とし, 装置の制約により ETL は 7 で検討した.

b) TR に対する生理食塩水の SNR

加算を 2 回行う場合の TR を 3000 ms から 10000 ms に変化させて生理食塩水を撮像し, SNR を算出した. 実効 TE は 1300 ms, ETL は 256 を用いた.

c) 加算回数と SNR

TR 8000 ms で, 加算回数を 1 回から 5 回に変化させて, 生理食塩水の SNR を算出した. 実効 TE は 1300 ms, ETL は 256 を用いた.

2) 健常ボランティアによる検討

健常ボランティア 1 名で以下の検討を行った. 撮像条件はファントム実験をもとに Table 1 の条件とした.

a) 加算回数 (NSA)

加算回数を 1 回から 4 回に変化させて撮像し, 画質を視覚評価した.

b) スライス厚

スライス厚を 40 mm から 60 mm に変化させて撮像し, 画質を視覚評価した.

c) 画像評価

ファントムおよび健常ボランティアによる検討で求めた撮像条件 (Table 2) を用いて, 健常ボランティア 5 名を撮像し, 1 名の放射線技師, 2 名の放射線科医師で視覚評価を行った. 撮像は正面前後方向, 左右斜位 35° の 3 方向を

2000年4月24日受理 2000年6月21日改訂

別刷請求先 〒710-8602 岡山県倉敷市美和 1-1-1 倉敷中央病院放射線センター 田淵 隆

Table 2. Imaging Parameters Optimized for Clinical Use

FOV (RFOV)	250 mm (50%)
TR	8000 ms
TE	1400 ms
slice thickness	40 mm~60 mm
ETL	256
NSA	2
matrix	256 × 128
	(pixel size : 0.97 × 0.97 mm)
sampling frequency	250 Hz/pixel
echo spacing	10.9 ms
effective scan time	10.8 s

撮像した。評価点は以下の3段階とし、髄液腔、内部構造（脊髄、神経根）について3名の合意のもとに点数を決定した。

- 1点 (poor) : 髄液腔あるいは内部構造の認識が困難である。
- 2点 (good) : 髄液腔は高信号として描出されるが、信号が低下したり、辺縁が不鮮明な部分が認められる。
- 3点 (excellent) : 髄液腔は全長にわたって辺縁平滑な著明高信号を示す。内部の脊椎、神経根が全長にわたって陰影欠損像として鮮明に描出される。

結 果

1) ファントムを用いた撮像条件の検討

a) 実効 TE と各試料の SNR とコントラスト

実効 TE の延長に伴い、生理食塩水、ベビーオイル、塩化ニッケル水溶液の SNR は低下を示した。TE が 800 ms 以上では、ベビーオイル、塩化ニッケル水溶液の SNR はほぼゼロとなり、生理食塩水のみが高い SNR を示した。また、コントラストは、1100 ms で最大になった (Fig. 1)。

b) TR に対する生理食塩水の SNR

TR の延長とともに生理食塩水の SNR は増

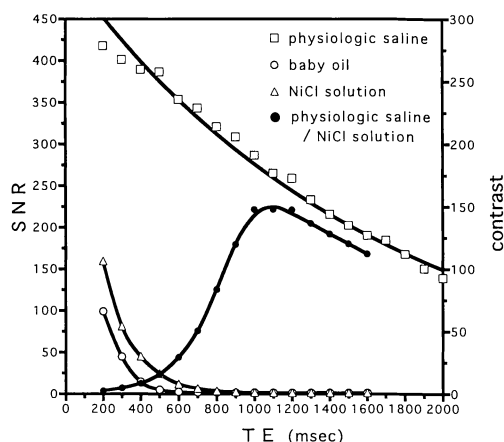


Fig. 1. Signal-to-noise ratio of physiologic saline and contrast of physiologic saline to NiCl₂ solution as a function of effective TE.

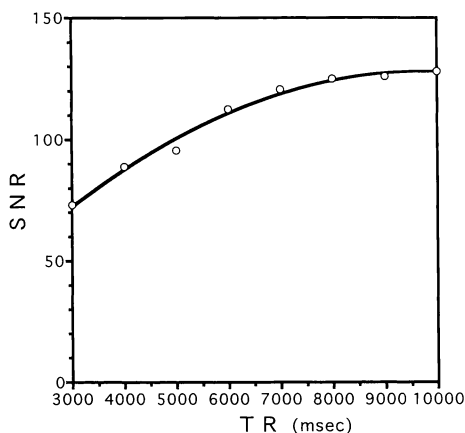


Fig. 2. Signal-to-noise ratio of physiologic saline as a function of TR.

加し、約 8000 ms で SNR はほぼ最大値に達し、それ以上ではプラトーを示した (Fig. 2)。

c) 加算回数と SNR

NSA の増加に伴い生理食塩水の信号強度には大きな変化は見られなかったが、バックグラウンドの標準偏差が低下し、結果として SNR は上昇した (Fig. 3)。

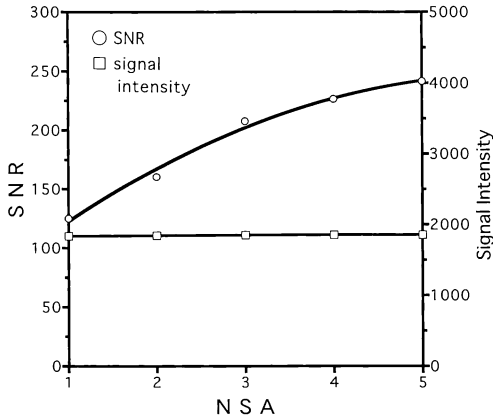


Fig. 3. Signal-to-noise ratio and signal intensity of physiologic saline as a function of number of signals averaged (NSA).

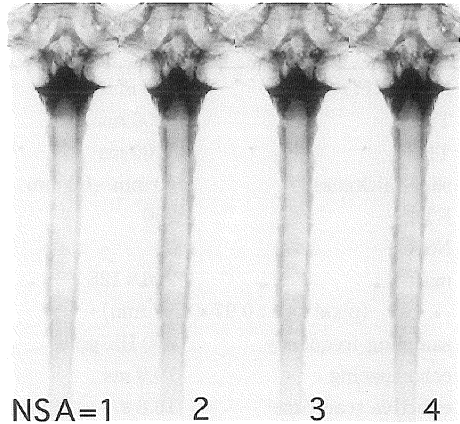


Fig. 4. Comparison of MR myelogram obtained with NSA instrumentation.

2) 健常ボランティアによる検討

健常ボランティアによる検討 a), b) に用いる撮像条件は, ファントムの実験 a), b) の結果を考慮し以下のごとく設定した. ファントム実験 a) から, ほぼ脳脊髄液のみの信号を得るためには, 実効 TE は 800 ms 以上必要であり, かつ 1100 ms で高いコントラストが得られることがわかったが, 頸部専用コイルを用いた場合の装置の制約により, 最短実効 TE は 1400 ms となり, この値を用いることとした. また, ファントム実験 b) から, TR は高い SNR を得るために 8000 ms 以上が必要と思われたため 8000 ms に設定した (Table 1).

a) 加算回数

加算回数 1 回よりも, 2 回の方が脳脊髄液の信号強度が強く, 辺縁の細部や内部の神経根の描出に優れていた. 加算回数 2~4 回の間には視覚的に画質の差が見られなかった (Fig. 4).

b) スライス厚

スライス厚, 40 mm, 50 mm, 60 mm の比較では, 視覚的に画質の差は認められなかった (Fig. 5).

c) 画像の評価

以上の検討から, single-slice 頸部 MR my-

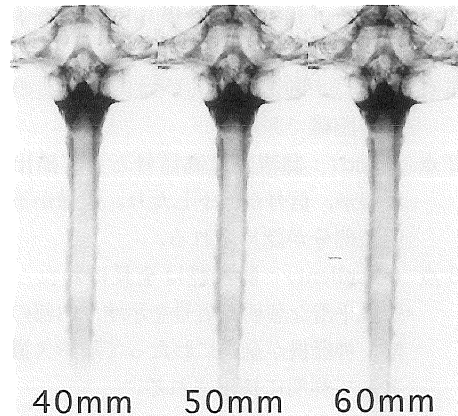


Fig. 5. Comparison of MR myelogram obtained with various slice thickness.

elography の最適撮像条件を Table 2 のように設定した. この条件で撮像した健常ボランティア 5 名による single-slice 頸部 MR myelography の視覚評価の結果を Table 3 に示す.

髄液腔のスコアは, 5 名全例 3 点で頸部全長にわたって著明な高信号を示した. 脊髄においても全例 3 点で, 長細い陰影欠損像として鮮明に描出された. 神経根のスコアは, 平均 2.6 点で 2 名で部分的に不鮮明であったが (2 点), 3 名では脊髄腔内を走行する連続性のよ

Table 3. Assessment of Image Quality of MR Myelogram in Healthy Five Volunteers

	mean±S.D.	percentage of score=3
thecal sac.	3	100%
spinal cord	3	100%
nerve roots	2.6±0.55	60%

score 1:poor 2:good 3:excellent

い糸状の陰影欠損像として鮮明に描出された(3点)(Fig. 6).

考 察

MR myelography は非常に強い T₂ 強調像を用いて、脳脊髄液の信号を強調した画像である。生理的に存在する脳脊髄液の信号を利用している点が X 線 myelography とは大きく異なり、造影剤を用いる必要はなく、非侵襲的で安全である。

その手法には、MR cholangiopancreatography と同様に、multi-slice 法と single-slice 法がある。前者は、多数の薄い断層像を 2D あるいは 3D で撮像し、maximum-intensity-projection (MIP) 再構成により、myelogram を得る方法であるが、比較的長い撮像時間を要する^{5),6)}。また、MIP 再構成を行った場合、髄液に囲まれた脊髄や神経根の情報を失う可能性がある⁷⁾。後者の single-slice 法は脳脊髄腔を含んだ厚い 1 断面で撮像するもので、MIP 再構成は不必要である。透視画像の特性をもち、X 線 myelography と同様の画像が得られるため、内部の構造は透視することができる。短時間で撮影可能であるため体動の影響も少ない^{8),9)}。

従来、頸部 MR myelography の報告の多くは、TSE 法を用いた multi-slice 法によるものであるが、腰部に比べて良好な画像を得ることが比較的困難とされていた^{3),4)}。これは、頸椎は元々髄液腔が狭く、髄液の拍動の影響が強い

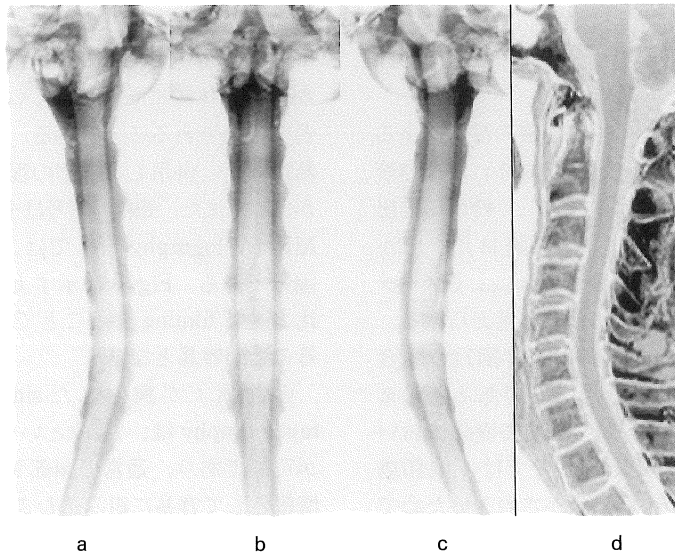


Fig. 6. MR myelogram of healthy volunteer obtained with optimized parameters shown in Table 2.
a. RAO position of 35°, b. anterior-posterior view, c. LAO position of 35°, d. sagittal fat-suppressed T₂-weighted image.

こと、また、頸部の複雑な形状のために背景の脂肪信号を抑制する目的での脂肪抑制法が安定しないこと等の理由が考えられる。その報告の多くは、実効 TE を 100~400 ms に設定して撮像されており^{9)~11)}、この場合、周囲の静脈も高信号として描出され、背景の脂肪信号の抑制効果が不十分な場合もあり、必ずしも良好な画像が得られるとは限らない。また、撮像時間が数分から数十分と比較的長いため、体動による影響も大きい。

今回我々は、single-shot TSE を用いた single-slice 頸部 MR myelography について検討した。この方法では、256 のエコートレイン数 (ETL) を用い、一回の励起で得られるエコーデータを k 空間の辺縁 (高周波数領域) から線形に配置することにより非常に長い実効エコー時間を設定することができる。この非常に長い実効エコー時間のもとでは、ファントム実験でも示されたように、脳脊髄液以外の背景信号はほとんど無信号となる。脂肪抑制法は背景の脂肪信号を抑制し、鮮明な myelogram を得るために有用ではあるが、本法のように非常に長い実効 TE を用いた場合は、脂肪信号もほとんど無信号を示すため、必ずしも併用する必要はないと考える。

今回の我々の手法では脳脊髄液の流れによる髄液腔内の信号低下はほとんど見られず、髄液腔内の内部構造も陰影欠損像として鮮明に描出できた。これは、短いエコー間隔および refocusing 効果により脳脊髄液の流れによるアーチファクトは低減されているためと考えられる。

ファントム実験から、加算を 2 回行う場合の TR は、最低 8000 ms は必要であると考えられた。長い T₂ 緩和時間を有する液体において、8000 ms 以下の TR のもとでは、飽和効果により加算効果が十分に生かされないためである。また、ファントム実験では、加算回数が多いほど SNR は上昇したが、健常ボランティアでは、加算回数 2 回と 3 回以上では差が認められなかった。加算回数を増すほど撮像時間

が延長し、かえって体動の影響などが加わる可能性もあるため、加算回数は 2 回とした。

スライス厚は、頸椎の彎曲を考慮し、40 mm 以上は必要と考えられた。ボランティアでは 40 mm から 60 mm の間で画質の差は認められなかった。しかし、実際はスライス厚を厚くすると、咽・喉頭の動きの影響が加わると予想されるため、必要最小限の厚さで撮像している。

本法では髄液腔の辺縁やその内部の脊髄、神経根は鮮鋭に描出された。一般に TSE 法においては、長い ETL を用いた場合の特徴的なアーチファクトとして、T₂ filtering 効果による blurring artifact がある¹²⁾。Blurring は隣り合うエコーの信号強度の差が大きいほど強くなるが、本法は T₂ 値が極端に長い脳脊髄液を短いエコー間隔を用いて画像化するため、隣り合うエコーの信号強度の差は小さく blurring artifact は弱いと考えられる。また、エコーデータを k 空間の辺縁から配列することにより空間分解能を支配する高空間周波数領域に高い信号を配置できるため、鮮鋭な画像が得られたと考えられる。

本法の問題点としては、頸椎は髄液腔が狭いため全体的に SNR が低く、狭窄部が強調されて描出されることである。この場合は、矢状断像などと併用して狭窄の程度を評価する必要がある。また、頸椎の信号は全く消失するため、MR myelography のみでは、レベルの決定が困難である。Fig. 6 に示すように矢状断像と対比させて filming することで、レベルを認識することが容易となる。

今回我々が検討した single-slice 頸部 MR myelography は、11 秒という短時間での撮像が可能であり、通常頸部 MRI 検査に付加的情報として容易に組み込むことができる。髄液腔の全体像を概観でき、狭窄部位のレベルや程度を一目で把握することができる。また、髄液の流れによるアーチファクトもほとんど見られないことから髄液腔内の小さな硬膜内髄外腫瘍

などによる陰影欠損の検出にも有用である。

Single-shot TSE 法を用いた single-slice MR myelography は簡便で、安全な検査法で臨床応用も容易であるため、X線 myelography に置き換わる検査法として期待される。

結 語

Single-shot TSE 法を用いた single-slice 頸部 MR myelography の最適撮像条件について検討を行った。撮像時間 11 秒で良好な MR myelography を撮像することが可能であった。

文 献

- 1) Hammer B, Deisenhammer E : Iotrol, a new water-soluble non-ionic dimeric contrast medium for intrathecal use. *Neuroradiology* 1985 ; 27 : 337-341
- 2) Seigel R, Williams AG, Wateman RE : Potential complications in myelography : 1. technical considerations. *AJR* 1982 ; 138 : 705-708
- 3) Krudy AG : MR myelography using heavily T₂-weighted fast spin-echo pulse sequences with fat presaturation. *AJR* 1992 ; 159 : 1315-1320
- 4) Van Dyke CW, Modic MT, Beale SM, Amartur S, Ross JS : 3D MR myelography. *JCAT* 1992 ; 16 : 497-500
- 5) Zisch RJ, Hollenbach HP, Artman W : Lumbar myelography with three-dimensional MR imaging. *JMRI* 1992 ; 2 : 731-734
- 6) Eberhardt KEW, Hollenbach HP, Tomandl B : Three-dimensional MR myelography of the lumbar spine. *Eur Radiol* 1997 ; 7 : 737-742
- 7) 赤羽正章, 土屋一洋, 町田 徹 : MR myelography. *臨床画像* 1999 ; 15(3) : 290-296
- 8) Demaerel P, Bosmans H, Wilms G, et al. : Rapid lumbar spine MR myelography using rapid acquisition with relaxation enhancement. *AJR* 1997 ; 168 : 377-378
- 9) Tsuchiya K, Mizutani Y, Hanaoka H, Kobayashi K, Hachiya J : Very rapid lumbar magnetic resonance myelography with a half-Fourier single-shot turbo spin echo sequence. *Intl Nueroradiology* 1999 ; 2(3) : 231-234
- 10) El Gammal T, Brooks BS, Freedy RM : MR myelography : imaging findings. *AJR* 1995 ; 164 : 173-177
- 11) 横山邦彦, 井上義久, 河野 亨, 久保敦司 : 頸椎 MR-myelography の有用性. *臨床放射線* 1997 ; 42(2) : 209-215
- 12) Mulkern RV, Melki PS, Jakab P, Higuchi N, Jolesz A : Phase-encode order and its effect on contrast and artifact in single-shot RARE sequence. *Med Phys* 1991 ; 18(5) : 1032-1037

Cervical MR Myelography Using a Single-shot Turbo Spin-echo Sequence

Takashi TABUCHI, Takashi KIYONO, Masayuki KUMASHIRO,
Kazuaki NAKATA, Yoshinori KAGAWA, Hideki MITSUI,
Fumie SASAKI, Masako DOHKE, Yuji WATANABE

*Department of Radiology, Kurashiki Central Hospital
1-1-1 Miwa, Kurashiki, Okayama 710-8602*

Recent development of single-shot turbo spin-echo (TSE) sequence enables one to obtain a single-slice image in a short imaging time. The imaging parameters of single-slice MR myelography for cervical spine were optimized by using both phantom and volunteer studies.

With the extremely long effective TE (more than 800 ms), background signals including fat were shown to be completely suppressed. In contrast, physiologic saline showed extremely high signal intensity, which provided a high contrast of CSF signal to the background signal. Optimum scan parameters were determined to be as follows ; TR/effective TE of 8000/1400 ms, echo train length of 256, 250 mm FOV, 2 NSA, 40-60 mm thick slice. By using these parameters, excellent cervical MR myelograms with less flow artifacts could be obtained.