

MRI による緩和速度測定の精度評価：同一マグネットを用いた MRS との比較

前田宗宏（岡崎生理研 分子生理）	亘 弘（ 同 上 ）
鈴木賢一（ 同 上 ）	岩崎 聖（奈良医大 放・腫放）
市川 修（ 同 上 ）	大石 元（ 同 上 ）
瀬尾芳輝（ 同 上 ）	打田日出夫（ 同 上 ）
村上政隆（ 同 上 ）	

キーワード

MRI, MRS, relaxometry

1. はじめに

MRI による緩和時間測定に関しては、測定精度の問題や測定対象の不均一性の問題などのために、臨床応用の初期ほど重要視されなくなった様である。しかし、緩和時間そのものがあまり重要視されない反面、正確な T_1 値、 T_2 値測定を前提とすべきコントラスト・マップや合成画像などの画像処理が臨床応用されている¹⁾²⁾。また、効率良く信号を観測できる撮像条件の決定や流速測定の際には、緩和時間は重要なパラメータの一つとなる³⁾。

MRI で得られたデータを解釈し利用するにはその精度を把握しておくことが必要であるが、測定精度の検討がほとんどされないまま臨床応用が行われているのが現状である。

同一マグネットを用い、MRI 法と高分解能 NMR (MRS) 法で塩化マンガン溶液の緩和速度を測定し、2 法での測定結果を比較したので

報告する。

2. 材料と方法

緩和速度測定を試料として 0.1 mM~0.9 mM の 9 種類の濃度の塩化マンガン水溶液を用いた。塩化マンガン溶液の濃度と緩和速度は比例することが知られている。MRI と MRS で得られた緩和速度と塩化マンガン濃度との回帰直線の傾きと相関係数を用いて MRS および MRI の緩和時間測定の精度を評価した。

MRI による緩和速度の測定：使用装置は、日立製の静磁場強度 2.1 テスラの超伝導型 MRI である。塩化マンガン水溶液を入れた直径 3cm の試料瓶をならべて、1cm 厚、フィールド・サイズ 25 cm、測定マトリックス 128×128、平均加算 2 ないし 4 回、シングル・スライスで撮像した。この撮像条件では、スライス選択の方向に 0.304 G/cm、位相エンコード方向に最大 0.8 G/cm、周波数エンコード方向に 0.566 G/cm の磁

場勾配がかかる。パルス幅 4msec のジック波形の RF パルスを用い、90°RF パルスの調節は、一連の緩和時間の測定ごとにおこなった。

円形の ROI (面積 5cm², ピクセル数 530 個) を用いて画像上の溶液の相対信号強度を求め、受信器の減衰率とフーリエ変換ならびに画像化の際の 2 つの標準化係数で補正して各々の絶対信号強度を計算した。

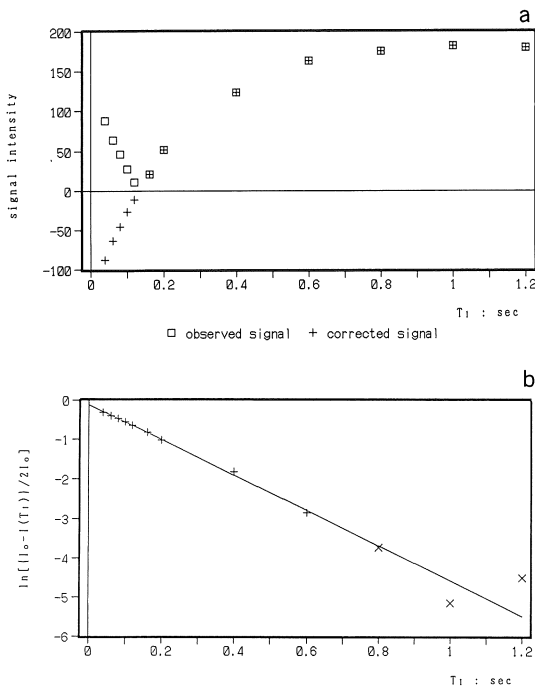


図 1 T₁ 緩和時間の測定 (MRI, MnCl₂: 0.6 mM)
 a. 縦軸に信号強度 (I), 横軸に反転時間 (T₁) をとった。
 b. 縦軸に $\ln\{[I_0 - I(T_1)]/2I_0\}$, 横軸に T₁ をとると、回帰直線の傾きは $-1/T_1$ となる。緩和時間の計算には熱平衡状態ちかくまで緩和した観測点のデータを除外した。
 (+採用データ, ×除外データ)

T₁ 測定には、IRSE 法 (T_R-180°-T₁-90°-T_E/2-180°-T_E/2-acquire) を用いた。繰り返し時間 (T_R) は、測定する溶液の T₁ 値の 5 倍以上となるように設定した。反転時間 (T₁) を 40, 60, 80, 100, 120, 160, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1800 msec とし、エコー時間 (T_E) を 30 msec とした。MRI では信号の符号は表示されないため、T₁ が T_{null} より短いと考えられるデータに関しては負の値になおして T₁ 値を算出した (図 1)。

T₂ 測定には、SE 法 (T_R-90°-T_E/2-180°-T_E/2-acquire) で、エコー時間 (T_E) を 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 80, 100, 120 msec とした。T_R は、T₁ 値の 5 倍以上となるように設定した。

MRS による緩和速度の測定：高分解能 NMR による測定には、日立製 R-90H スペクトロメーターとイメージング用磁石内に設置した高分解能用プローブを用いた。MRI で用いたのと同じ塩化マンガン溶液を直径 1cm の試料管に入れ、観測周波数を水の共鳴周波数に正確に合わせて (on resonance) 測定した。測定で用いた 90° パルスの幅は、16.5 μsec であり、積算回数は 1 回で行った。

T₁ 測定には IR 法 (180°-τ-90°-acquire) を用い、τ を 50 msec から 1450 msec まで 50 msec 間隔に設定した。FID は、検波後 100 μsec ごとに Transient memory (IWATSU DM501) に取り込み、トリガー信号から 4msec 分のデータをマイクロコンピュータ (PC-9801) に転送した。観測された各々の FID の 4 番目から 6 番目の 3 ポイントの振幅の平均を信号強度とした (図 2)。

T₂ 測定は、CPMG 法 (-90°-{τ/2-180°-τ/2-acquire}_n) を用いた。T₁ 測定と同様にデータを Transient memory (IWATSU DM501) を経由してマイクロコンピュータ (PC-9801) に転

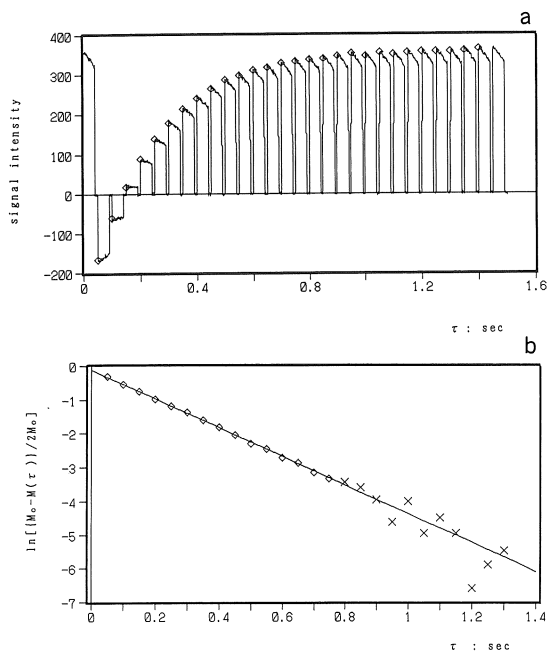


図2 T_1 緩和時間の測定 (MRS, MnCl_2 : 0.6 mM)
 a. 縦軸に信号強度 (M), 横軸に反転時間 (τ) をとった。
 b. T_1 緩和時間の計算には熱平衡状態ちかくまで緩和した観測点のデータを除外した。
 (◇採用データ, ×除外データ)

送した. 0.1 mM~0.5 mM の塩化マンガン溶液についてはエコー時間 (τ) を 2.5 msec, 0.6 mM~0.9 mM の溶液に関しては 1.25 msec に設定した. それぞれの溶液について 60 個のエコーの測定を行い, T_2 の計算には得られた信号のうち偶数番目のエコーの信号強度を用いた.

3. 結果

塩化マンガン濃度を横軸に緩和速度 ($1/T_1$, $1/T_2$) を縦軸にとって回帰した直線の傾きは, MRI と MRS でほぼ一致した (図 3, 4).

測定結果のばらつきの指標となる塩化マンガ

ン濃度と緩和速度の相関係数は, MRI (T_1 値: 0.957, T_2 値: 0.939) では MRS での相関係数 (T_1 値: 0.982, T_2 値: 0.982) と比較して有意に低かった (危険率 5% 未満). しかし, T_1 値で 200 msec 以上, T_2 値で 20 msec 以上の範囲に限れば, MRI による緩和速度の測定結果のばらつきは, MRS による測定結果と有意差がみられなかった.

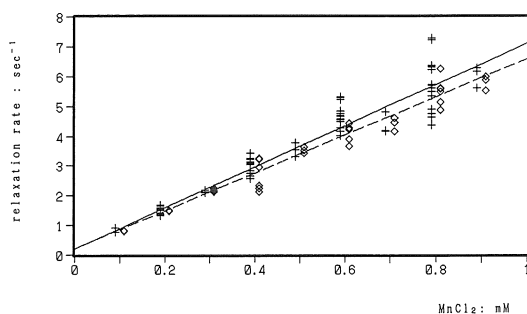


図3 MnCl_2 水溶液の T_1 緩和速度の測定結果 (+ ——MRI, ◇ -----MRS)
 緩和速度 (回帰直線の傾き) は, MRS より MRI で求めた方がわずかに大きい傾向がみられるが, 統計学的に有意差 (危険率 5%) はなかった.

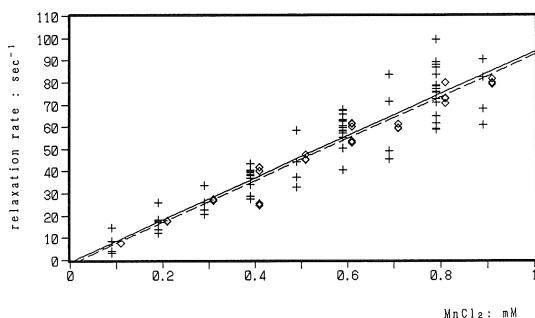


図4 MnCl_2 水溶液の T_2 緩和速度の測定結果 (+ ——MRI, ◇ -----MRS)
 MRI は, MRS に比べ測定結果にばらつきが大きい, 緩和速度の回帰直線は一致した.

4. 考 察

MRI の測定結果のばらつきが MRS と比較して大きかった。従来より、MRI は MRS に比べて緩和時間測定の精度が低いとされ、次の要因が挙げられている。①静磁場の均一性：MRI の静磁場の均一度は、30 cm のフィールド内で 5 ppm 以下であり、MRS と比較して 2 桁くらい低い⁴⁾。MRI で測定した横緩和時間は、MRS の測定結果より短くなるのが予想される。また、時間的な磁場の変動は、測定誤差の原因となる。② RF パルスの均一性：測定フィールド内に均一に RF パルスが入らなければ、場所により測定される緩和時間が異なる。また、選択励起に用いられるジंक・パルスが不完全であるためにスライスの厚み方向の両端近傍では正確な励起が行われず、測定誤差の原因となる⁵⁾。③勾配磁場：MRI では撮像にエコー信号を利用するので、スライスの切り出し、周波数エンコード、位相エンコードのための磁場勾配により横緩和が加速される影響は避けられない⁶⁾。しかし、緩和時間測定には、信号強度の差が問題であるので、勾配磁場の影響は少なくなると考えられる。

今回の実験結果で MRI で測定した緩和時間が MRS と比べ短い傾向があったが、その差は有意でなかったことより磁場の均一性や勾配磁場に関しては、MRI での緩和時間測定の根本的な障害とはならないと考えられる。MRI で緩和時間算出に有効な観測点が多くとることのできた緩和時間の比較的長い測定でのばらつきが小さいことは、適切な観測点を十分にとることで、MRI 測定精度を MRS に近づけられることを示唆する。

MRI で T_1 緩和時間の測定と比較して T_2 緩和時間の測定結果にばらつきが大きかったのは、 T_2 緩和測定の方が、 T_1 緩和測定に比べて上記要因による影響を受け易いことと、装置上の制限から 15 msec 以下の短いエコー時間のデータが得られないためであると考えられる。

MRI と MRS での緩和時間の測定結果が一致したことは、MRI が緩和時間の測定装置として利用できるということであり、時間的ならびに空間的に磁場の均一性を向上させ適切な撮像条件で十分な観測点をとることで MRI による測定で精度の高いデータが得られることが期待される。

5. ま と め

MRI による緩和時間測定の精度を評価するために、同一磁場で MRI と MRS を用いて緩和時間測定をおこなったところ、MRI と MRS での測定結果が一致した。

適切な撮像条件で十分な観測点をとれば、MRI においても信頼性のある緩和時間測定ができ、定量的な検討が可能であることが示された。

文 献

- 1) 山本哲夫, 田中 仁: パーソナルコンピュータによる MRI の画像処理. 日磁医誌 Vol. 7 No. 4, 250-257, 1988
- 2) 成瀬昭二, 堀川義治, 田中忠蔵, 他: MRI 合成画像の臨床的意義. NMR 医学 Vol. 6 No. 4, 293-305, 1987
- 3) Becker ED, Ferretti JA, Gambhir PN: Selection of optimum parameters for pulse fourier transform nuclear magnetic resonance. Analytical Chemistry Vol. 51 No. 9, 1413-1420, 1979
- 4) Gadian DG: Nuclear magnetic resonance and its applications to living systems. Oxford university press. New York, 1982 p.133-138
- 5) Rosen BR, Pykett IL, Brady TJ: Spin-lattice relaxation time measurements in two dimensional NMR imaging: Correlations for plane selection and pulse sequence. J Comput Assist Tomogr 1984; 8: 195-199
- 6) Carr HY, Purcell EM: Effects of diffusion on free precession in nuclear magnetic resonance experiments. Phys Rev 1954: Vol. 154 No. 3 630-638

Evaluation of accuracy in MRI relaxometry : Comparison with MRS relaxometry using the same magnet

Munehiro Maeda

(Dept. of Molecular Physiology, Okazaki
National Institute for Physiological Sciences)

Kenichi Suzuki

(Dept. of Molecular Physiology, Okazaki
National Institute for Physiological Sciences)

Osamu Ichikawa

(Dept. of Molecular Physiology, Okazaki
National Institute for Physiological Sciences)

Yoshiteru Seo

(Dept. of Molecular Physiology, Okazaki
National Institute for Physiological Sciences)

Masataka Murakami

(Dept. of Molecular Physiology, Okazaki
National Institute for Physiological Sciences)

Hiroshi Watari

(Dept. of Molecular Physiology, Okazaki
National Institute for Physiological Sciences)

Satoru Iwasaki

(Dept. of Radiology and Oncological Radiology,
Nara Medical College)

Hajime Ohishi

(Dept. of Radiology and Oncological Radiology,
Nara Medical College)

Hideo Uchida

(Dept. of Radiology and Oncological Radiology,
Nara Medical College)

In order to evaluate the accuracy of MRI relaxometry, relaxation times of manganese solutions (T_1 : 100~1500 msec, T_2 : 10~150 msec) were measured by MRI method and high resolution NMR (MRS) method using the same magnet of 2.1 tesla. There was no significant difference in relaxation rates measured by MRI and MRS. MRI was as accurate as MRS in measuring the solutions with relaxation time of longer than 200 msec in T_1 and that of longer than 20 msec in T_2 . These results suggest that accurate relaxation time measurement can be achieved using MRI.