

領域選択 NMR 法における化学シフトによる選択誤差： Clinical Spectroscopy でのピットフォール

奥村 亮介¹, 安里 令人¹, 小西 淳二¹

¹京都大学医学部核医学科

序 論

スライス選択傾斜磁場を用いる領域選択法においては、その方向での化学シフトによる artifact が問題になる。すなわち、スライス選択方向の座標は、スライス選択傾斜磁場を重畳した状態での共鳴周波数で定義されるため、スライス選択 RF 波と同じ帯域の共鳴周波数を持つ物質なら正確に位置を表現できるが、共鳴周波数の異なる物質が混在するとそれぞれの物質の位置座標のオフセットが異なり、それぞれ異なる位置からの信号を重ねあわせて同一の面内に表現することになる¹⁾。以後、この現象を (chemical shift induced) slice displacement artifact と呼称する。これらはスライス選択方向について画像上でははっきりと認識されないため、大多数の臨床家にはこれまであまり問題にされなかったのが

実状である。

この研究の目的はプロトンとリンにおいてこの現象を birdcage coil 内で直接測定し、解析す

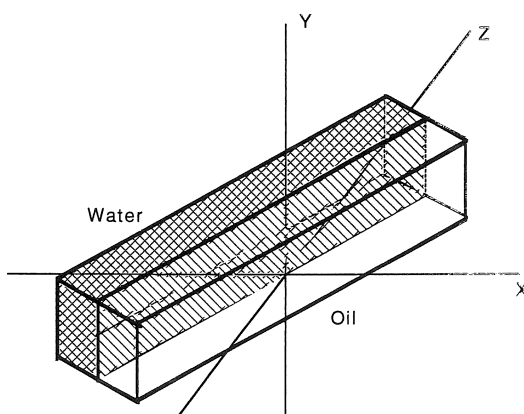


Fig. 1-a
ファントムの模式図、Z軸が長軸方向、ファントムは角度をつけられ、設置されている。

キーワード volume selective spectroscopy, slice displacement artifact, birdcage coil

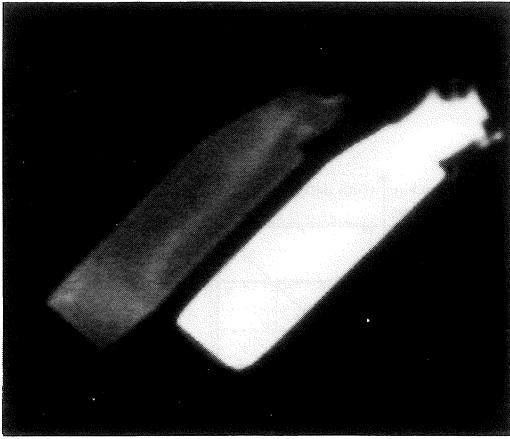


Fig. 1-b
ファントムの冠状断像，写真左には水，右には油が封入されている。

ることにある。

A) Slice displacement artifact の画像化 (Fig. 1~4)

水と油をそれぞれ入れたファントムを用意し，頭部用 Birdcage coil 内でコイル長軸と角度をつけて置き横断像を撮像する。傾斜磁場反転のテクニックを用い，通常は気づきにくい Slice displacement artifact がよくわかるようにしている。

この傾斜磁場反転は，斜台内の脂肪髄の高信号を避け，下垂体後葉の脂肪ではない高信号を観察するため，よく使用する手法であり，臨床的に有用な方法である^{2),3)}。

B) Slice displacement artifact の理論的背景

Fig. 4 Graph 1 において，スライス選択傾斜磁場内で周波数帯域にあわせて位置設定がなされる時，化学シフトの異なる物質，例えば水と油は，基本となる斜線がずれている。このため周波数情報で位置を決しようとする水と油で位置は異なってくる。

ところで化学シフトの影響を評価するのにい

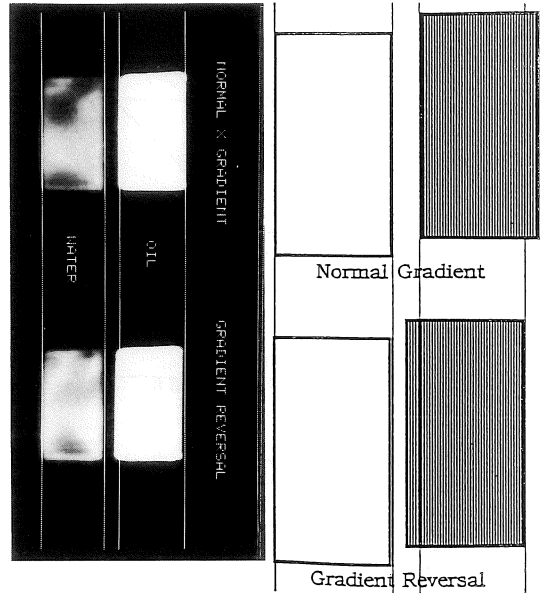


Fig. 2
ファントムの横断像(写真)とその右は対応させたシェーマ。上段は通常のスライス選択傾斜磁場で撮像した像。下段はスライス選択傾斜磁場を反転させて撮像した像。それぞれ別々に全く同じスライス位置を撮像したものを比較するために CRT 上で合成し，縦線を加えた (TR/TE-300/20, SE 法, 10mm スライス厚)。上下が周波数，左右は位相エンコード方向であり，左の水に対する右の油のイメージされる位置が異なっている。油が周波数方向でずれるのは chemical shift misregistration artifact であり，水と油の間隔が狭まって見えるのは，slice displacement artifact の影響による。

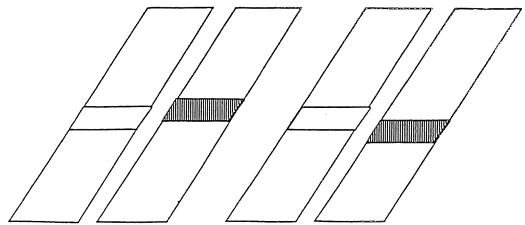


Fig. 3
間隔が狭まる原因の模式図それぞれ水と油を封入したファントムを表し，選択励起されて画像化される面を表している。スライス選択傾斜磁場を反転させると，slice displacement artifact により，水を選択励起面が同じでも，油の選択励起面は異なるため画像が異なる。

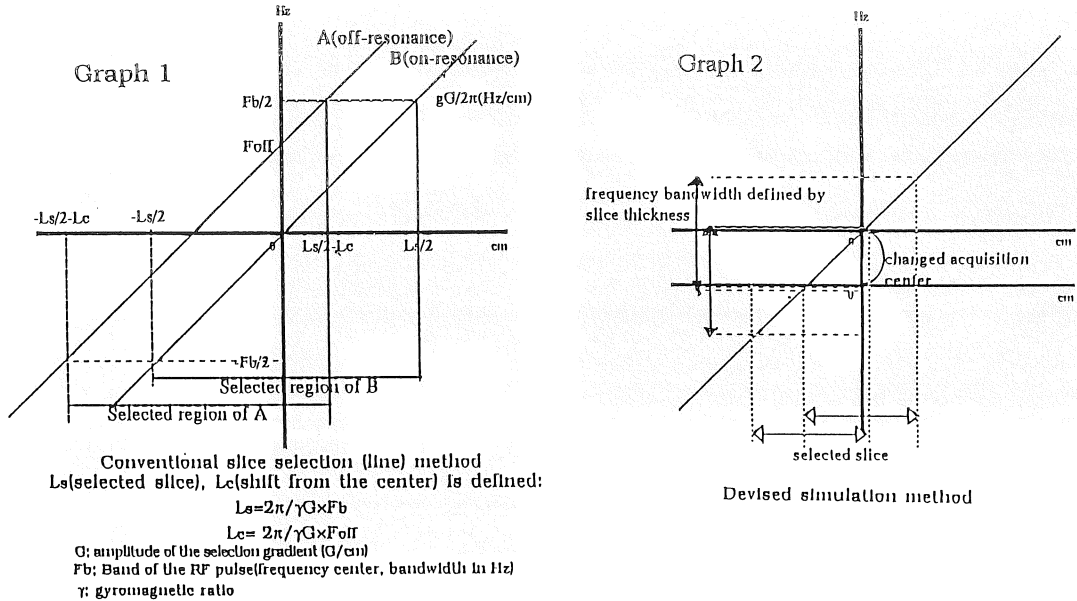


Fig. 4. Graph 1

スライス選択のシエマ。横軸 location 位置, 縦軸周波数。スライス選択傾斜磁場ないで周波数帯域にあわせて位置設定がなされる。化学シフトの異なる物質, 例えば水と油は, 基本となるこの斜線が平行移動する。このため周波数で位置決定をしようとするときそれぞれ位置は異なってくる。

Fig. 4. Graph 2

中心周波数変更のシエマ。横軸基線が平行移動する。これは変化させた周波数と同じだけ化学シフトの異なる物質をオフレゾナンスで励起している状態と同じ事になる。

ちいち化学シフトの異なる物質を用意するのは面倒かつ実験に制限が加えられる。

本研究では以下に説明する化学シフトの影響をシミュレーションする方法を考案し, これに基づき実験を展開したので先に説明を述べる。

Signa システムでは prescan でモニターされた共鳴周波数をスライス選択方向の中心に設定する。ここでこの送受信周波数を変えて入力すると, Fig. 4 Graph 2 の如く横軸基線が変化することになる。これは変化させた周波数と同じだけ化学シフトの異なる物質をオフレゾナンスで検査している状態と同じことになる。グラフ上では Graph 1 で斜線を平行移動させているかわりに Graph 2 で横軸を平行移動させていることになる。

実験

1) プロトン画像上での現象の評価, 定量

上記したシミュレーション法にて化学シフトの異なる物質を想定してその影響を表現し, スライス選択方向のアーチファクトによるずれの値を測定した。

方法:

実験 1) Fig. 5, 6

ビーカとピペットに 10 mM 硫酸銅水溶液を封入し Y 軸方向に 2 段に重ねたファントムを用意する (Fig. 5)。オンレゾナンスの横断像で正確にそれぞれのファントムの位置を測定し, その位置を参照して, 冠状断面にて中心周波数変更

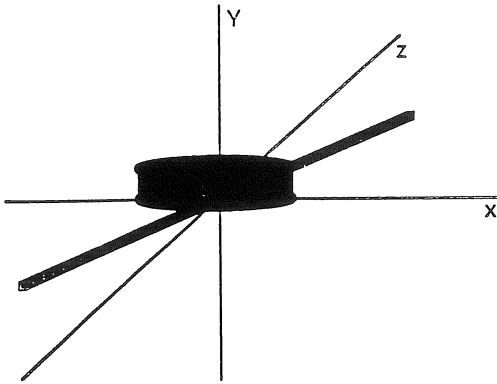


Fig. 5
Birdcage coil内のファントムの模式図。
Z軸がコイルの長軸方向であり、上の円柱がピーカ内の硫酸銅水溶液、下の細い棒柱がピペット内の硫酸銅水溶液を表す。円柱と棒柱のX-Z平面上の中心は原点に揃えて置かれ、かつY軸方向に重ねて置かれている。

によるスライス選択の影響を観る。

実験2) Fig. 7~9

細長い棒柱状のファントムを斜めに置き、中心周波数を変化させて矢状断上を撮像し、CRT上のずれの測定から slice displacement artifactの値を計算する。

結果：

実験1) Fig. 6

横断像より、Y軸上での上の円柱の中心と下の棒柱の中心の間隔は11mmと測定された。x-z平面に平行な冠状断像を撮像すると、冠状断でのスライス選択はその位置を入力するとオン-レゾナンスにては正確になされていることがわかった。しかし、中心周波数を1163Hzずらす

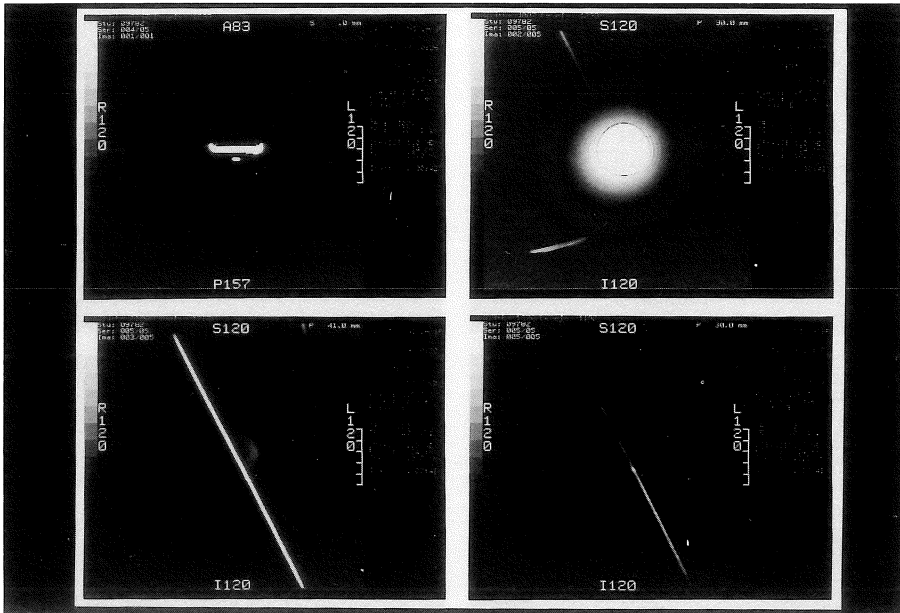


Fig. 6
共鳴周波数はジャストリゾナンスで63868892Hz. TR/TE-300/20, スライス厚10mm.
左上はX-Z平面の原点を通る横断像。CRT上で上のファントムの中心はP30, 下のファントム中心はP41と測定され、11mmの間隔がある。
右上はP30を入力した冠状断像。
左下はP41を入力した冠状断像。
少し見にくいですが右上にスライス選択の中心座標が表示されている。それぞれスライス選択がなされているためファントムの片方だけ画像化されている。
右下はP30を入力し、中心周波数をこの撮像時だけ63867729Hzに設定した。円柱部をスライスすべきはずが棒柱部をスライスしている。

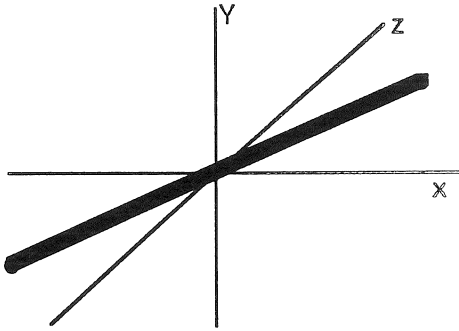


Fig. 7
Biedcage coil内に硫酸銅溶液を封入したピペットをZ軸に角度を持たせX-Z平面上に設置した模式図、Z軸はコイルの長軸にあたる。

と上の位置の入力で下のピペットがスライスされる。すなわち 18.209 ppm 化学シフトが離れた物質は 11 mm 離れた位置から信号を出してくる。

実験 2) Fig. 8, 9

中心周波数を 1000, 1500, 1800 Hz の三段階ずらした撮像を提示している。

画像上で上下方向のずれは slice displacement によるものであり、左右方向のずれは化学シフト misregistration artifact に相当する。画像上の測定及びファントムの角度から、スライス選択方向の slice displacement が計算できる。結果は、0.01019 mm/Hz すなわち 0.604 mm/ppm であった(角度 70°, CRT 上 28 mm/kHz)。

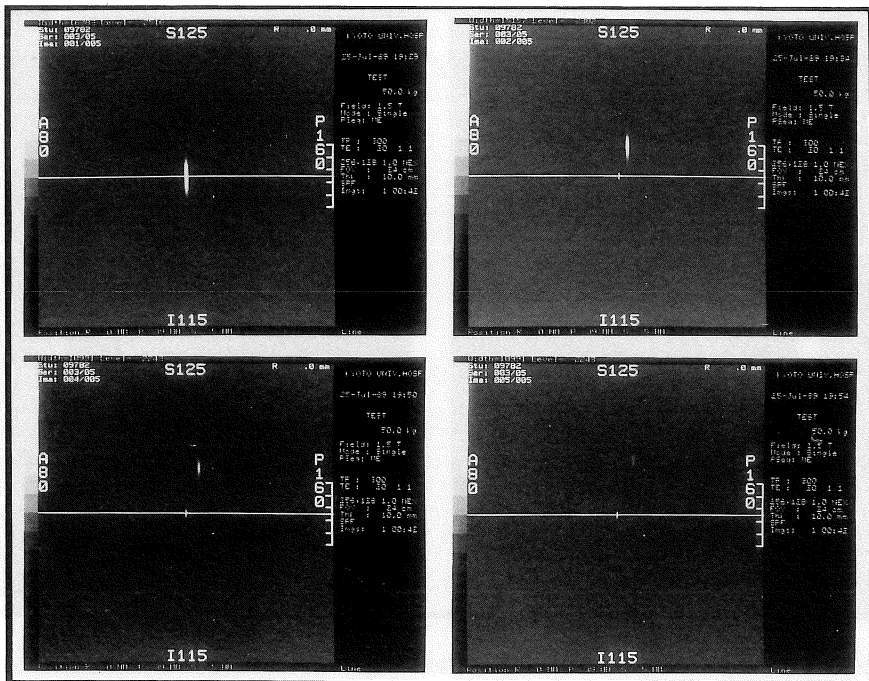


Fig. 8
矢状断撮像画像。
左上、ジャストリゾナンスにて得られた像、中心周波数63868902 Hz(基準周波数)
右上、中心周波数+1,000 Hz
左下、中心周波数+1,500 Hz
右下、中心周波数+1,800 Hz
での矢状断像。

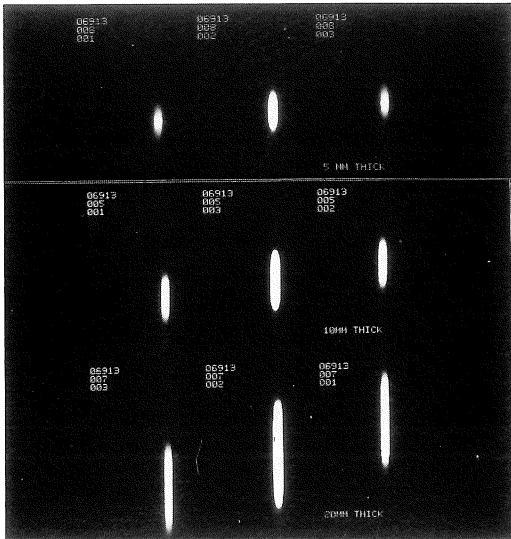


Fig. 9

上段, スライス厚 5 mm (左から, -500 Hz, 基準周波数, +500 Hz)
 中段, スライス厚 10 mm (左から, -500 Hz, 基準周波数, +500 Hz)
 下段, スライス厚 15 mm (左から, -500 Hz, 基準周波数, +500 Hz)
 の中心周波数で撮像し, CRT 上で並べた. 画像上上下方向が位相
 エンコード方向であり, スライス選択のずれを表す.
 スライス厚に比例してずれは大きくなった.

Fig. 9 に示す如く slice displacement はスライス厚に比例し, 他の実験では FOV (field of volume) に影響された.

2) ^{31}P スライス選択スペクトロスコピーにおける現象の評価, 定量

^{31}P スペクトロスコピーにおいても DRESS 法では, 表面コイルからの深度の位置座標にスライス選択傾斜磁場を用いている. 従って, これまでプロトン画像で示してきた化学シフトによるスライス選択のずれは必ず存在し, しかも化学シフトの幅が大きく, 使用されるスライス厚も厚く, このアーチファクトの影響がより大きい事が予想される. しかし, 深度, 位置によって感受性の異なる表面コイルでは定量的な検討は不可能だった.

横河メディカルシステム技術部製作の燐用の birdcage coil の使用によって, 均一な磁場から信号測定が可能になり, すなわち, ある一定の範囲内で燐スペクトルの信号強度の定量性が得

られるならば, 位置選択が信号強度の増減で検討可能となると考えられた.

以上の理由により, 準備として以下の実験を行った.

- 1) Fig. 10 上図の如く, 無機燐酸を封入した Y 軸方向に十分な長さを持つ円柱を Y 軸に平行に設置したファントムにおいて, 冠状断 DRESS 法スペクトルを選択スライスの中心 (Y 軸の値) を漸次変化させて DRESS スペクトルを得た.
- 2) Fig. 10 下図の如く, 無機燐酸を封入した偏平な直方体ファントムを Y 軸上で上下に動かし, 位置は body coil のイメージングから測定し, スライス選択の中心にあわせて冠状断 DRESS スペクトルを得た.

1), 2) それぞれの実験において,

スペクトルの信号強度は FOV 24 cm の範囲内で冠状断面の位置にかかわらず一定であった. 従って信号強度の定量性が確認された.

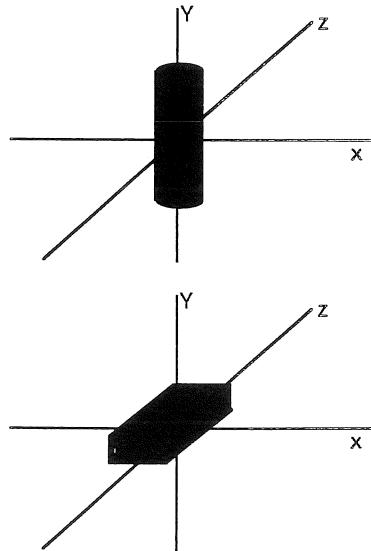


Fig. 10

上段, 無機燐酸を封入したメスシリンダーを bird cage coil 内に設置した模式図. 下段, 無機燐酸を封入した偏平な容器を X-Z 平面に平行に設置した模式図. ともに Z 軸がコイルの長軸にあたる.

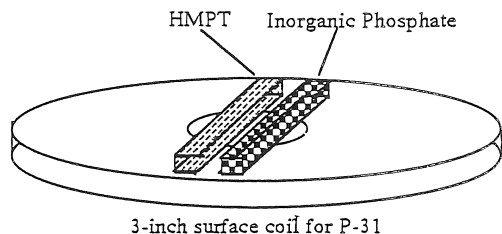


Fig. 11
実験 3 の模式図。3 インチの表面コイル上に HMPT と無機
磷酸を封入した試験管を対称性に並べ、スペクトルを測定し
た。位置は体部コイルのイメージングで測定した。

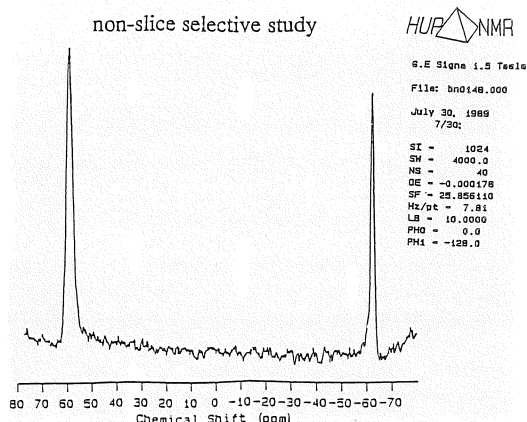


Fig. 12

^{31}P での slice displacement 現象の表示と定量。
以下の実験においてリンスペクトルはすべて特
に断らないかぎり、DRESS 法、スライス厚 25
mm, TR=2000 ms, 15 回加算、でデータ採取
し、HUP 232⁴⁾ で処理したものを使用している。

実験 3) Fig. 11 アーチファクトの表示

方法: Hexamethylphosphorous triamide
(以下 HMPT と略す) と無機磷酸を対称性に表
面コイル上に並べ、スライス選択を行わない方
法、及び、DRESS 法でスライス選択中心を変化
させてスペクトルを測定した。

実験 4) slice displacement の測定

方法: Fig. 10 下図の如く、扁平な無機磷酸フ
ァントムを birdcage coil 内中心部に固定して、
Y 軸上のファントムの中心位置と選択スライス
中心を一致させ、かつスペクトルのピーク位置
と中心周波数も一致させ DRESS スペクトルを得
た。これを基本にして、

- A) 中心周波数を 50 Hz ずつずらしながら冠状
断スペクトルを得た。
- B) 冠状断選択励起スライスの位置を操作上で
1 mm ずつ変化させスペクトルを測定する。
信号強度は正確を期すため用紙にプロット
したスペクトルを切り抜いて重量を測定し
た。

A) B) の比較にて slice displacement を測

定した。

結果:

実験 3) スライス選択なしのスペクトル (Fig.
12) では、左に無機磷酸のピーク (共鳴周波数
25854483 Hz), 右に HMPT のピーク (共鳴周
波数 25857658 Hz) が観られた。無機磷酸濃度
はほぼピークが HMPT に等しくなるよう調整し
ている。体部コイルで測定した両試験管の位置
は機械上で、仰臥位の人を対象とした前後方向
を表す値で P 5 だった。冠状断 DRESS スペクトル
を選択スライスの中心を 5 mm ずつずらし、A 10,
A 5, A 0, P 5, P 10, P 15, P 20 と変化させて
得た (Fig. 13)。中心周波数は真中の 25856071
Hz に固定し、スライス選択の中心は機械の操作
上の設定を変えた。

ピークの信号強度比はスライス選択位置に応
じてそれぞれ異なっている。これを説明する理
由はこの中心基準周波数のスライス選択傾斜磁
場上で無機磷酸は P 5 よりも前方向、HMPT は
より後ろ方向にあると誤認されているからであ
る。

実験 4) Fig. 14

実験 A) B) の信号強度の変化をそれぞれグ
ラフ A と B に示す。両者はほぼ直線型に信号強
度を減じた。このグラフ A と B において、直線

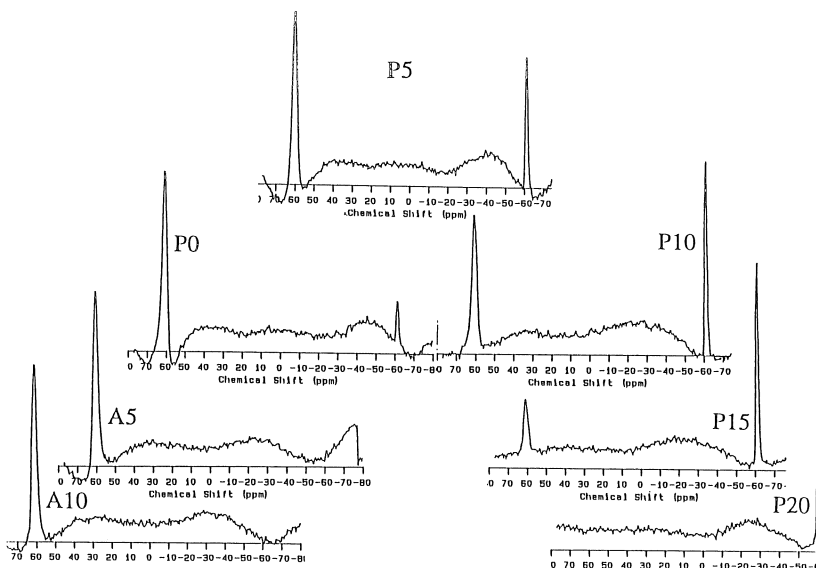


Fig. 13
スライス選択位置を操作上で変えるだけで、スペクトルの信号強度が変化するのがわかる。P 5 が真の試験管の位置だが、スライス選択傾斜磁場上で認識されている位置は異なっているため P 5 のスライス選択で両者とも信号強度が最大にならない。

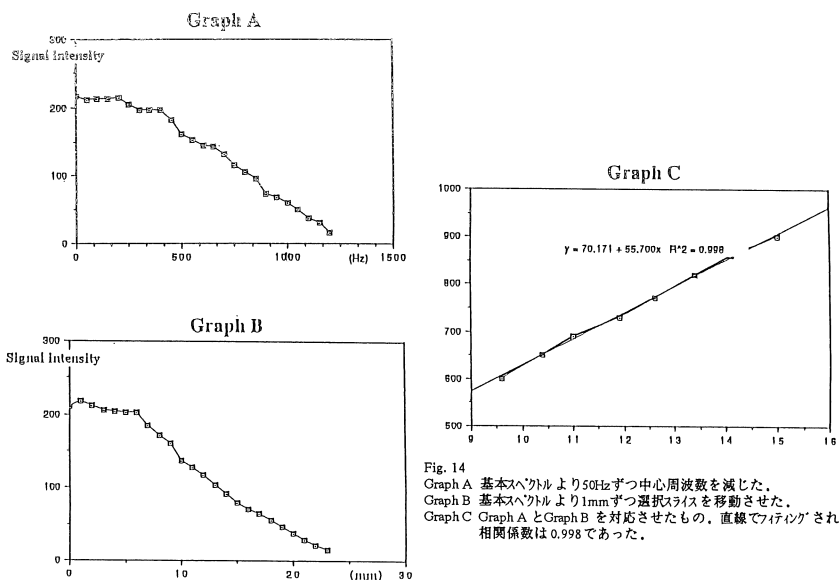


Fig. 14
Graph A 基本スペクトルより50Hz ずつ中心周波数を減じた。
Graph B 基本スペクトルより1mm ずつ選択スライスを移動させた。
Graph C Graph A と Graph B を対応させたもの。直線でフィッティングされ、相関係数は0.998であった。

Fig. 14
Graph A 基本スペクトルより50 Hz ずつ中心周波数を減じた。
Graph B 基本スペクトルより1 mm ずつ選択スライスを移動させた。
Graph C Graph A と Graph B を対応させたもの。直線でフィッティングされ、相関係数は0.998であった。

型減少を示す部で、信号強度を共通項にして、A)の周波数差と、B)の移動距離を対応させたのがグラフCである。

A)は化学シフトの違いによる slice displacement をシミュレートしている。B)はスライス選択磁場座標上でスライス選択励起面をファントムからずらしている。実際はA), B)とも同じ事を操作を変えて観ているだけであるが、当然のことながら、C)において両者は相関係数0.998の比例関係を呈し、直線の傾きが化学シフトによる励起面のずれの割合に相当する。測定上は0.464 mm/ppmと計算された。

考 察

^{31}P clinical NMR spectroscopy においてそのスペクトル信号がどこから得られているかは大きな問題である。現在の領域選択法の大部分はスライス選択傾斜磁場を使用しているが、選択面の正確さについて、またその座標の化学シフトの依存性についてはさほど十分な議論はなされていない事も多い。

プロトン画像でも評価したようにスライス選択傾斜磁場を使用すれば、必ず slice displacement が化学シフトの異なる物質についておこり、得られたスペクトル信号の位置はそれぞれ異なる。序論で述べたシュミレーション手法により定量的な化学シフトの影響の評価が簡単に可能となった。

DRESS法は最も標準的な局所選択法であるため、この検討に選んだ。slice displacement についても原著論文で指揮されているのだが、前述した理由により十分な評価はされていなかった^{5),6)}。しかし、われわれの実験において計算された値は、例を挙げれば約18 ppmの化学シフトを持つPCrと β -ATPは約8.35 mm ずれた面から信号を得ている事になる。これはかなり大きい値であり、実際にDRESS法を臨床に使用する

においては留意すべきことと考えられた。この化学シフトによるずれに対しては、位置情報を位相情報に載せて、傾斜磁場を使用しない各次元の化学シフトイメージング法や、様々な化学シフトの持つ成分に対してスライス方向での空間的符号化により、位置の補正を行うなどの対策などが考えられている。

結 論

proton 画像と ^{31}P DRESS 法スペクトロスコピーにおいてスライス選択傾斜磁場での励起面の化学シフトによる slice displacement を検討した。実際上、proton 画像ではあまり問題とならないが、 ^{31}P NMR spectroscopy では注意すべき結果を得た。

他のスライス選択傾斜磁場を使用する領域選択法についても、化学シフトによる座標軸変化について評価する必要がある、使用に際しては十分な知識と留意が必要と考えられた。

尚、この論文の要旨は第14回核磁気共鳴医学会で発表した。

文 献

- 1) Park HW, Kim DJ, Cho ZH: Gradient reversal technique and its application to Chemical-Shift-Related NMR Imaging. Magn Reson Med 4: 526-36, 1987
- 2) Fujisawa I, Asato R, Nishimura K: Anterior and Posterior Lobes of the Pituitary Gland: Assessment by 1.5 T MR Imaging. J Compt Assist Tomogr 11, 214-20, 1987
- 3) Fujisawa I, Asato R, Kawata M, Sano Y, Nakao K, Yamada T, Imura H, Naito Y, Hoshino K, Noma S, Nakano Y, Konishi J: Hyperintense signal of the posterior pituitary on T1-Weighted MR Images: An experimental study. J Compt Assist Tomogr 13: 371-77, 1989
- 4) Allman T, Holland GA, Lenkinski RE, Charles

HC: A simple method for processing NMR spectra in which acquisition is delayed: Applications to in vivo localized ^{31}P NMR spectra acquired using DRESS technique. Magn Reson Med 7: 88-94, 1988

5) Bottomley PA, Foster TB, Darrow RD: Depth

-resolved surface-coil spectroscopy (DRESS) for in vivo H-1, P-31 and C-13 NMR, J Magn Reson 59: 338-44, 1984

6) Aue WP: Localization Method for in vivo nuclear magnetic resonance Spectroscopy. Rev Mag Res Med 1: 21-71, 1988

**Chemical shift induced slice displacement artifact
along the slice selection direction
: A pitfall in clinical volume selective spectroscopy**

RYOSUKE OKUMURA,¹ REININ ASATO¹ and JUNJI KONISHI¹

*¹Department of Nuclear Medicine, Faculty of Medicine, Kyoto University
54 Shogoin-Kawahara-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606*

Chemical shift induced slice displacement artifact along the slice selection direction is well known. However, it has been sometimes despised in clinical examination, as the error due to this artifact was not manifested on either conventional clinical images or spectra. The error is considered to be more serious in ³¹P volume selective spectroscopy as the range of chemical shift is wider in ³¹P spectroscopy than in ¹H.

In this material, this artifact is investigated, and the direct measurement of the value of the artifact using the specially designed birdcage coil for ³¹P is performed.

The demonstrated value of the error is too large to be ignored on either proton imaging or ³¹P spectroscopy. We should pay more attention to this phenomenon.