

拡散強調画像(DWI)における信号強度は被写体の動きにより修飾される。特に肝は生理的運動に満ちた臓器であり、肝における信号強度は常に生理的運動により修飾されているといつてよい。またDWIにおける信号強度が正しく計測できていたとしても、肝を含む躯幹部の臓器でADCを正確に測定するためには、B₀画像とのズレによりADCが不正確になるという難題が控えている。

① B₀ 画像とのズレによる ADC 計測の不正確性

- ADC の算出には図 1 で示した 2 step からなる画像処理が必要。
- 上記した step 1, 2 のどちらでも位置ずれが生じれば ADC 計算は不正確になる。
- 特に step 2 での位置ずれは致命的(図 2)!

図1 DWI 画像と ADC map の作成方法

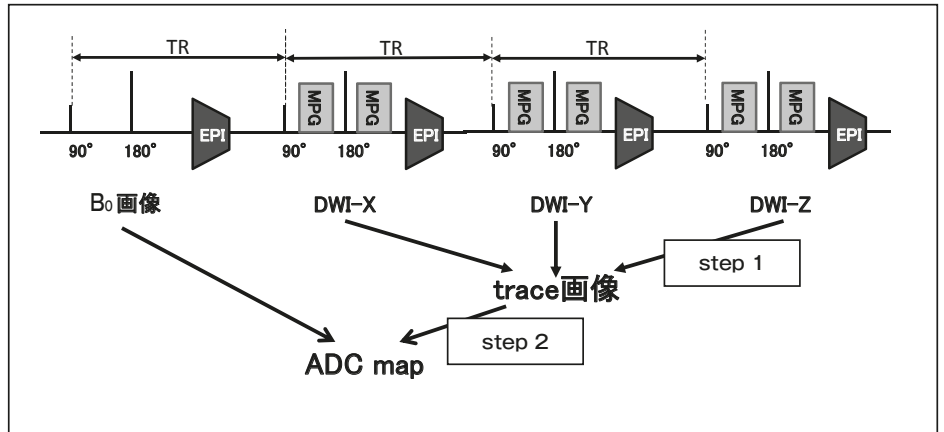


図2 B₀ 画像と DWI の位置ずれが ADC に与える影響

<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>充実性成分 SI = 400</td> <td>嚢胞成分 SI = 3000</td> </tr> <tr> <td>嚢胞成分 SI = 3000</td> <td>充実性成分 SI = 400</td> </tr> </table> <p>B₀画像</p>	充実性成分 SI = 400	嚢胞成分 SI = 3000	嚢胞成分 SI = 3000	充実性成分 SI = 400	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>充実性成分 SI = 150</td> <td>嚢胞成分 SI = 200</td> </tr> <tr> <td>嚢胞成分 SI = 200</td> <td>充実性成分 SI = 150</td> </tr> </table> <p>DWI画像(b=1000)</p>	充実性成分 SI = 150	嚢胞成分 SI = 200	嚢胞成分 SI = 200	充実性成分 SI = 150	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>充実性成分 ADC = 1.0</td> <td>嚢胞成分 ADC = 2.7</td> </tr> <tr> <td>嚢胞成分 ADC = 2.7</td> <td>充実性成分 ADC = 1.0</td> </tr> </table> <p>ADC map (位置ずれなし) ADCの単位はx10⁻³mm²/sec</p>	充実性成分 ADC = 1.0	嚢胞成分 ADC = 2.7	嚢胞成分 ADC = 2.7	充実性成分 ADC = 1.0
充実性成分 SI = 400	嚢胞成分 SI = 3000													
嚢胞成分 SI = 3000	充実性成分 SI = 400													
充実性成分 SI = 150	嚢胞成分 SI = 200													
嚢胞成分 SI = 200	充実性成分 SI = 150													
充実性成分 ADC = 1.0	嚢胞成分 ADC = 2.7													
嚢胞成分 ADC = 2.7	充実性成分 ADC = 1.0													

上記した B₀ 画像と DWI 画像が少しでもずれで ADC map が作成されると左図になる。

ADC = 1.0	ADC = 3.0	ADC = 2.7
ADC = 2.7	ADC = 0.7	ADC = 1.0

ADC map (位置ずれあり)
ADCの単位はx10⁻³mm²/sec

- ・かなり極端だが、**図2**で示したような組織が存在したとする。B₀画像とDWIの間に位置ずれがなければ充実部分のADCは $1.0 \times 10^3 \text{mm}^2/\text{s}$ 、嚢胞部分のADCは $2.7 \times 10^3 \text{mm}^2/\text{s}$ 、平均ADCは $1.85 \times 10^3 \text{mm}^2/\text{s}$ と算出される。
- ・この場合、充実部分のADCをこの組織の代表とさせたいのは当然(最小ADC法)。
- ・しかし、もしB₀画像とDWIとの間でズレがあるとADC map内部に本来存在しないはずのADC(この場合は $2.0 \times 10^3 \text{mm}^2/\text{s}$ と $0.7 \times 10^3 \text{mm}^2/\text{s}$)が算出されてくる。
- ・すなわち最小ADC法は本来、その組織には存在しない外れ値を、その組織を代表するADCにしてしまう危険性ははらんでいる。

②“弾性体としての肝”の運動とDWIの信号修飾とその対策—TRONとDWISBAP—

DWIの信号を修飾する“動き”とは？

- 剛体の等速直線運動は、まったく信号強度に影響を与えない(**図3上段**)¹⁾。
- 同じ剛体であっても加速度を伴った運動をしている場合、信号強度は低下する(**図3下段**)。
 - ▶ 要するにすべての生理的動きが信号修飾の原因になるわけではない!
- 肝の呼吸運動で加速度が生じるのは、呼気・吸気の終末期(運動方向が変わるので当然)。

1) Le Bihan D, et al: Artifacts and Pitfalls in Diffusion DWI. JMRI, 24: 467-488, 2006.

図3 ピクセル自体の動きがDWIの信号に与える影響

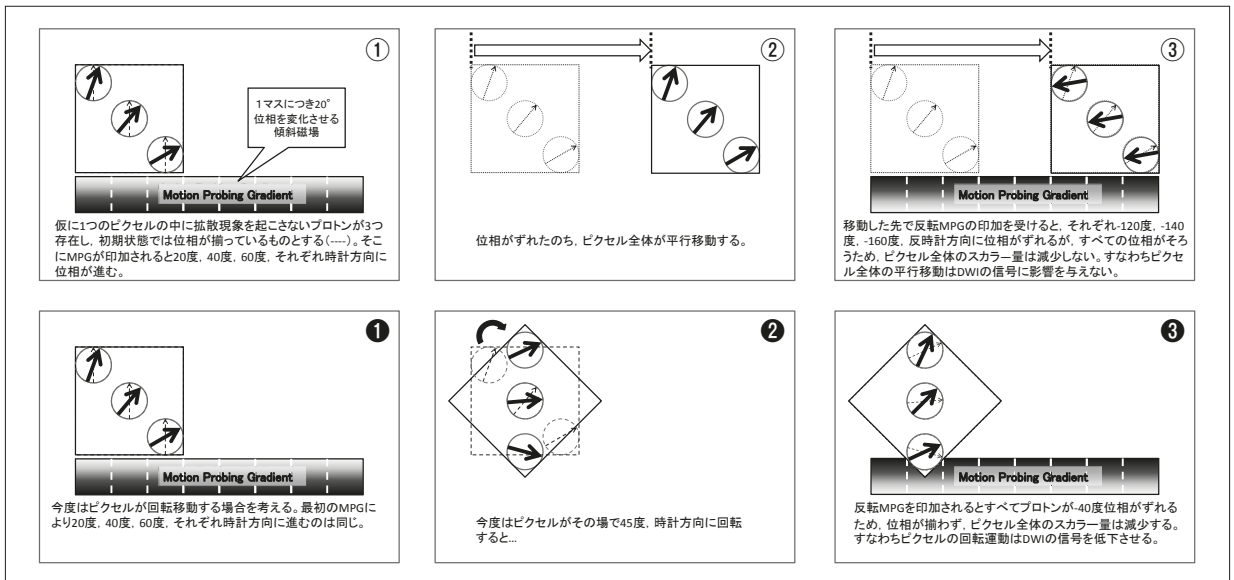
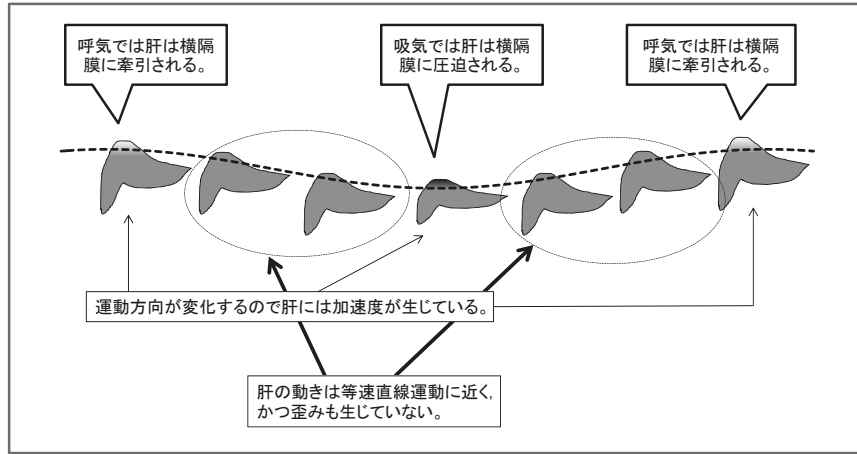


図4 呼吸運動と肝の歪み



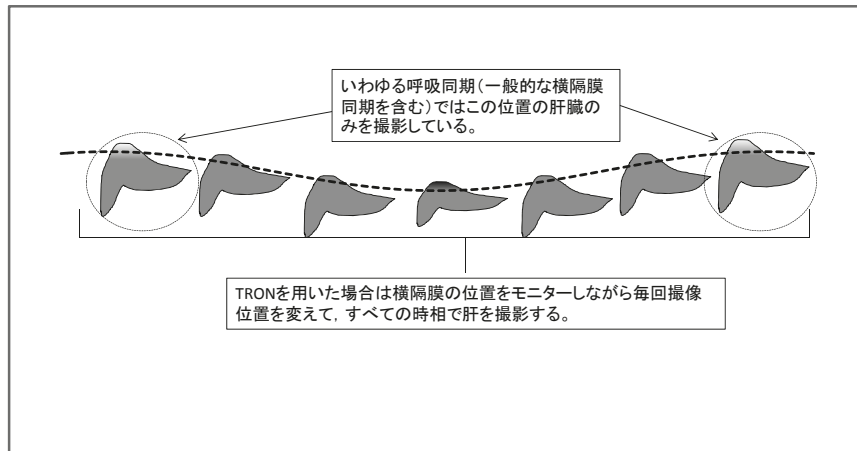
- 2) Nasu K, et al: Hepatic pseudo-anisotropy: a specific artifact in hepatic diffusion-weighted imaging obtained with respiratory triggering. MAGMA, 20: 205-211, 2007.
- 3) Kwee TC, et al: Comparison and reproducibility of ADC measurements in breath-hold, respiratory triggered and free-breathing diffusion-weighted MR imaging of the liver. JMRL, 28: 1141-1148, 2008.
- 4) Takahara T, et al: Diffusion-weighted magnetic resonance imaging of the liver using tracking only navigator echo: feasibility study. Invest Radiol, 45: 57-63, 2010.

- 実際の肝は弾性体なのでわずかな外力で変形する⇒信号強度に影響²⁾
▶ 特に呼気・吸気の終末期に歪む!
- つまり一見合理的な呼吸同期法は肝の DWI の最適解とはいえない(図4)。
- むしろ自由呼吸で吸気終末期, 呼気終末期以外の時相では, 肝は歪みが少なくかつその運動は等速直線運動に近い。

つまり自由呼吸下非同期撮影には合理性がある(TRON の基本概念)

- ・ ただし位置ずれによる ADC 計測の不正確性が生じるため, 位置補正が必要。
- ・ それが TRON (TRacking Only Navigator echo)! (図5)^{3,4)}。
- ・ Navigator echo で肝臓の位置の変化に合わせて撮影位置を毎回変化させるため, 自由呼吸下であっても位置ずれによる画像の修飾が生じにくい。

図5 TRON 併用の DWI の基本概念

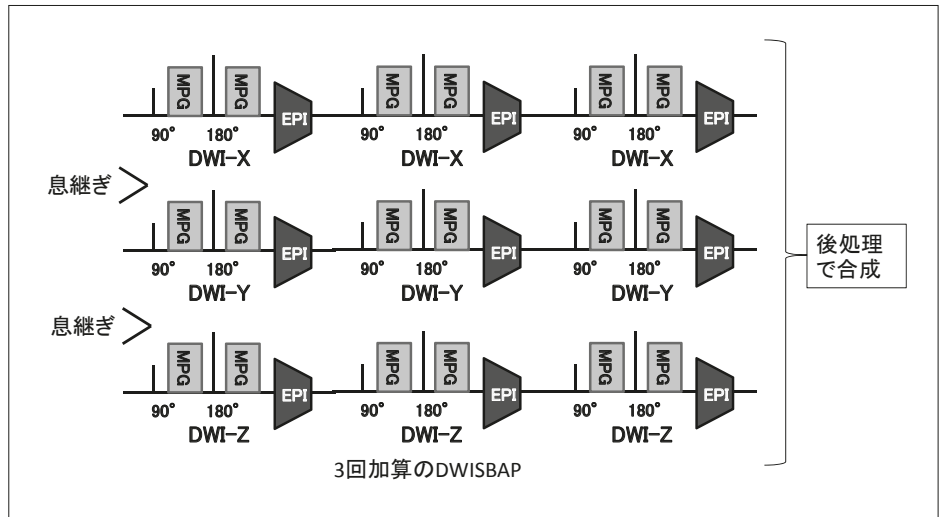


- 5) Bernstein MA, et al: Handbook of Pulse Sequence. Chapter 17 advanced pulse sequence technique. SanDiego: Elsevier, 802-896, 2004.

やっぱり息止めが必要なんじゃない?(DWISBAP の基本概念)

- ・ 息止めで撮影すれば加速度運動も歪みもなくなる。
- ・ 被写体の T1 緩和時間の 4~5 倍以上の TR を設定する必要がある。
▶ 対象は悪性腫瘍なので必要な TR は 4000ms 程度⁵⁾。
- ・ 多加算撮影は困難⇒ SNR が足りない!

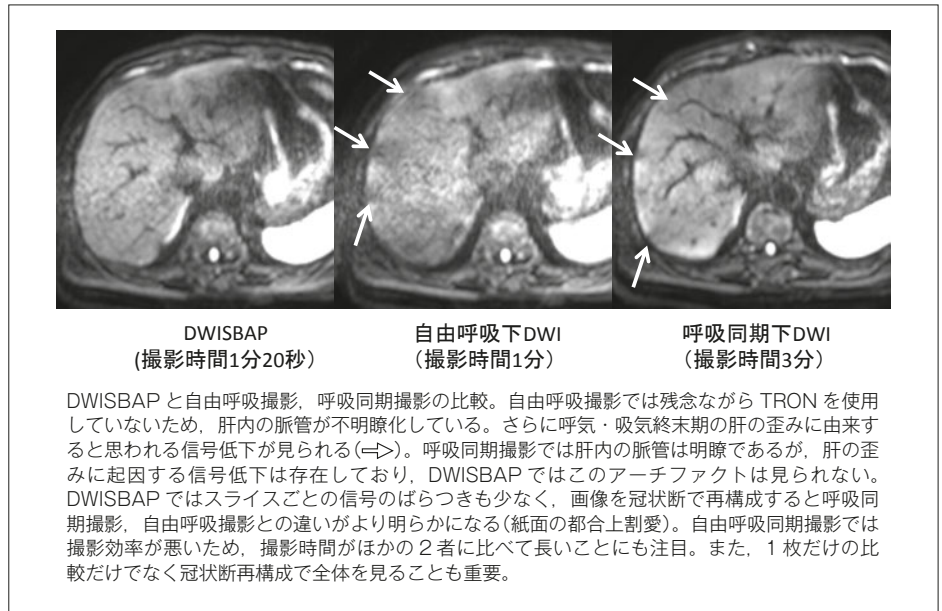
**図6 DWISBAPの
シエーマ**



6) Nasu K, et al: Feasibility of diffusion-weighted imaging under split breath-hold acquisition and postprocessing (DWISBAP): an attempt to suppress hepatic pseudo-anisotropy. JJR, 27: 78-85, 2009.

- ・上記の問題を解決するために考案されたのがDWI under Split Breath-hold Acquisition with Postprocessing (DWISBAP)⁶⁾。
- ・これは十分なTRをもたせた複数加算DWIを息継ぎを入れながら撮影し後で合成する方法(図6, 7)。

**図7 各種撮影方法の
比較**



8) Murtz P, et al: Abdomen: diffusion weighted MR imaging with pulse triggered single-shot sequences. Radiology, 224: 258-264, 2002.

③最後の難関、心拍による肝左葉の信号低下

- ・心拍動による肝実質の信号強度の修飾は左葉が顕著であるが、じつは右葉にも影響があることが報告されている⁷⁾。
- ・現時点において、これに対する有効な対処方法は脈波同期による終末拡張期での撮像のみ⁸⁾。ただし十分な効果を得るためには600ms程度のdelay timeが必要であり、実臨床では適応不能患者が多い。
- ・現実的には心拍による信号強修飾に対する対応方法は加算回数の増加とプスコパンの不使用くらい。
- ・この解決不能に思える難題にチャレンジする若き才能よ、腹部DWIの研究分野にたれ!