

## 特集 腹部の最新・機能画像

### 4. 腹部機能・動態MRイメージング —Time-SLIP法の応用を中心に—

伊東克能

川崎医科大学 放射線医学(画像診断1)

#### Functional and kinetic MR imaging of the abdomen focusing on Time-SLIP technique

Katsuyoshi Ito

Department of Diagnostic Radiology, Kawasaki Medical School

#### Abstract

This study presented functional and kinetic MR imaging of the abdomen focusing on Time-SLIP technique. Non-contrast enhanced portal flow dynamic MR imaging with Time-SLIP can reveal the relationship between splenic venous flow and superior mesenteric venous flow within the portal vein, and help elucidate alterations in portal flow dynamics in physiologic and pathologic conditions. Cine dynamic MRCP with Time-SLIP can visualize the physiologic flow of the pancreatic juice and bile juice noninvasively by labeling the moving pancreatic and bile juice flow, and enables us to evaluate excretion patterns of the pancreatic and bile juice. This technique may have the potential to evaluate pancreatic exocrine functions in patients with pancreatic diseases. These kinds of functional, kinetic and flow MR imaging can provide new diagnostic information that could not be obtained by conventional imaging techniques based on morphology. Development of the image analysis software will be indispensable for the wide-spread application of these techniques in the future.

**Keywords :** *Functional MR imaging, Time-SLIP, Pancreatic juice*

#### はじめに

画像診断技術の進歩に伴い、近年では腹部領域でも画像が高画質化・高分解能化しており、病理組織学的な変化と対比しうる、詳細な形態的变化をとらえることが可能となっている。一方で、病理組織像には反映されにくい病態もあり、それらを画像手法により診断することへの期待も大きい。とくに臓器や組織の機能、代謝状態、動態(動きや流れ、血流)に基づく診断は、発展途上で

はあるものの、臨床応用されている領域、手法もいくつかみられる。たとえば腹部領域のMRI診断では肝細胞特異性造影剤であるGd-EOB-DTPAを用いた造影MRIにおいて、肝実質への造影剤の取り込み程度から肝機能評価への応用が試みられている<sup>1)</sup>。MRスペクトロスコピーでは肝脂肪の定量化<sup>2)</sup>や肝エネルギー代謝変化の定量化<sup>3)</sup>が行われている。またGd-DTPA造影ダイナミックMRIでは肝血流量の定量化などを含めた肝血流動態の評価が可能であり、腎臓では腎機能評価や腎移植後の

急性腎障害の評価などに应用されている<sup>4)</sup>。本稿では小児腹部領域でも应用可能な機能・動態MRIイメージング法として、非造影門脈MRAおよびこれに空間選択的インバージョンリカバリーパルス (Time-spatial labeling inversion pulse : Time-SLIP) を併用した非造影MRAによる門脈血流動態評価法について述べる。またTime-SLIP法は血流だけでなく、膵液・胆汁・リンパ液などの体内の“流れ”を画像化することが可能であり、cine-dynamic MRCPによる膵液・胆汁の排出・循環動態評価についても述べる。

## 非造影MRA

門脈MRAは、これまでガドリニウム造影剤を用いた造影MRAによる手法が主流であったが<sup>5)</sup>、重篤な腎障害がある場合、ガドリニウム造影剤投与による腎性全身性線維症 (Nephrogenic Systemic Fibrosis : NSF) 発症との関連性が報告されており<sup>6,7)</sup>、慎重な投与が求められる。造影MRAの利点は同時に肝内の結節性病変の診断にも用いることができる点が挙げられるが、一方で、適切なタイミングでの撮像が行われなければ、不十分な門脈造影しか得られない危険性もある。これに対し、非造影MRAでは造影剤の使用がないために、安全性が高く、また生理的状态での血流動態を観察できることから、急速に普及してきている。腹部領域の非造影MRAには従来time-of-flight法やphase contrast法が用いられてきたが、撮像時間が長い体動によるモーションアーチファクトが生じたり、2Dによる撮像であることから、薄いスライスでの撮像ができず、分解能が低いことなどにより、十分な画質の門脈像が得られないことが多かった。しかし、近年では、T2強調系の高速スピネコー法であるFSE法やグラディエントエコー系のSSFP法が非造影MRAに応用されており、門脈や静脈などの比較的遅い血流も造影剤の使用なしに高信号域として描出することが可能である<sup>8)</sup>。いずれも3D撮像による3次元での観察が可能で詳細な門脈系の評価ができる (Fig.1)。撮像には呼吸同期法、呼吸停止法のいずれも用いることができる。呼吸停止法では、短い撮像時間で、撮像断面を変えながら、何度も繰り返して行うことができ簡便で有用性が高い。ただし空間分解能

がやや劣ること、呼吸停止時間には限界があるため1回の撮像範囲は限定されるという欠点がある。呼吸同期法では、安静呼吸下の撮像で、高S/N・高分解能の画像が得られ、撮像時間も2～3分で済むことから、呼吸停止下撮像が困難な小児の検査には適している。ただ呼吸が一定しない場合にはアーチファクトが強く生じる。

非造影門脈系MRAの撮像では、動脈系信号の重なりをできる限り排除することで門脈の描出能が向上することから、心電図同期法を併用して腹部大動脈系からの信号を抑制することが重要である。心拡張期では動脈信号が高信号となる一方、心収縮期では駆出された腹部大動脈からの血流信号がflow voidとなり黒く抜ける (低信号となる) 場合が多いため、収縮期での撮像を行うことで、良好な門脈像が得られる<sup>9)</sup>。また高信号を呈する腹腔内の脂肪信号を抑制することが門脈系の描出向上には不可欠であるが、その手法としてはSTIR法による脂肪抑制および選択的脂肪信号抑制パルス併用による脂肪抑制の2種類が挙げられる。いずれも脂肪信号抑制には有用な方法であるが、STIR法では末梢門脈枝のバックグラウンドとしての肝

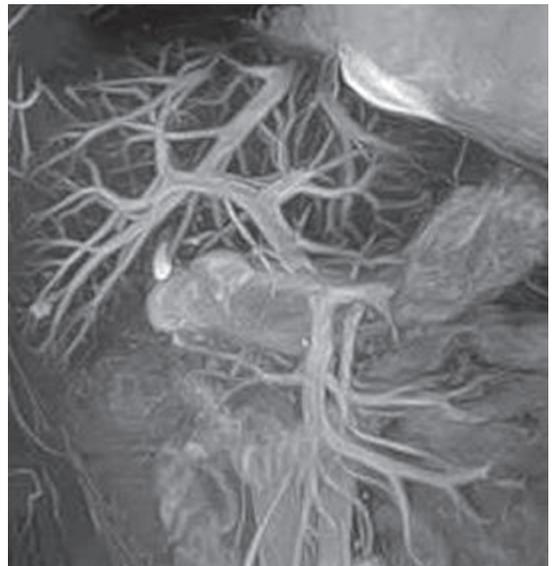
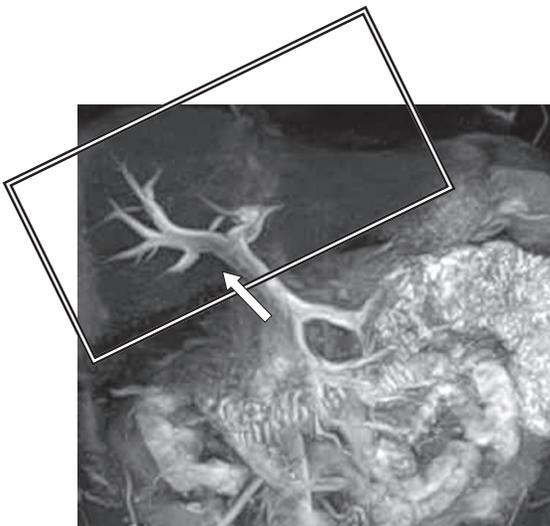


Fig.1 非造影門脈MRA  
3D-SSFP法による撮像で、上腸間膜静脈、脾静脈および門脈が明瞭に描出されている。肝静脈、一部の動脈、胆管の描出も認められる。

実質の信号抑制にも効果があることから、相対的に肝内門脈枝の描出能を向上させることができる。非造影MRAでは肝静脈も同時に描出されるが、3D撮像を行っていることから、MIP処理後のステレオ視により、門脈枝とは明確に分離することができる。造影MRAでは肝静脈枝を明瞭に描出することが困難な場合が多く、非造影MRAにおける肝静脈枝の同時描出はTIPSにおける穿刺経路の決定や肝切除術前における切離線の決定に役立つなど、臨床的な有用性が高い。

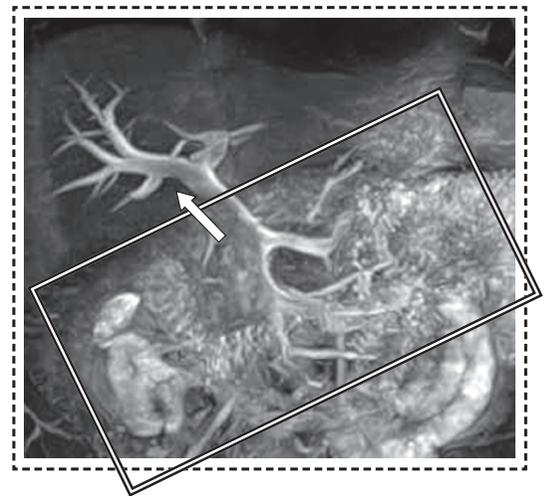
この心電図同期併用3D-FSE法または3D-SSFP法による門脈MRAの利点は、造影剤を使用しないこと、撮像断面を変えて繰り返し撮像でき、それにより多くの血管情報が得られること(側副路の描出を試みる場合にはその血管の走向に応じた撮像断面を再設定することができる)、またT2強調系の撮像法であるため肝外胆管も同時に描出され、門脈系と胆道系の位置関係、相互関係が把握できることが挙げられる。一方、両者の重なりという欠点もあるが、元画像での観察あるいはMIP処理後の3D画像をステレオ視することによりその区別は比較的容易である。



**Fig.2** Time-SLIP併用非造影門脈MRA  
肝臓領域にTime-SLIPを印加(白枠)し、肝臓の信号を全体に低下させた後、関心領域(肝内門脈)に流入してくる門脈血流(矢印)をIn-Flowとして高信号に描出する。

## Time-SLIPによる非造影門脈MRA

非造影MRAでは、空間選択的インバージョンリカバリーパルスをプレパルスとして印加することにより、関心領域(たとえば肝内門脈)に流入あるいは流出する血流を高信号に描出することも可能である。Time-SLIPは任意の角度で任意の範囲に印加できることが特徴である。この手法には2種類の方法があり、肝内門脈の描出を例にとると(Fig.2, 3), 1つはFig.2に示すように、肝臓領域にTime-SLIPを印加し、肝臓の信号を全体に低下させた後、関心領域(肝内門脈)に流入してくる門脈血流を高信号に描出するものである。もう1つはFig.3に示すように、まず非選択的なインバージョンリカバリーパルスをFOV全体に印加して、撮像範囲の信号を全体に低下させた後、Time-SLIPを脾静脈・上腸間膜静脈領域に印加してこれらの信号を再度反転して元に戻し、そこから関心領域(肝内門脈)に流出していくこれらの血流を高信号



**Fig.3** Time-SLIP併用非造影門脈MRA  
まず非選択的なインバージョンリカバリーパルスをFOV全体に印加(点線枠)して、撮像範囲の信号を全体に低下させた後、Time-SLIPを脾静脈・上腸間膜静脈領域に印加(白枠)してこれらの信号を再度反転して元に戻し、そこから関心領域(肝内門脈)に流出していくこれらの血流(矢印)を高信号に描出する。肝実質の信号は非選択的なインバージョンリカバリーパルスの効果で全体に抑制されている。

に描出するものである。いずれも肝実質の信号が全体に抑制されているため、肝内門脈は明瞭な高信号域として描出される。この方法では動脈、肝静脈の信号も抑制されるため比較的純粋な門脈像が得られる。

## Time-SLIP 併用非造影門脈血流動態 MR イメージング

非造影門脈MRAでは良好な門脈像が得られ、門脈の形態・分岐や閉塞の有無を観察することが可能である。しかし、これはあくまでも静止画像であり、“流れ”そのものは評価できない。また門脈には主として脾静脈血流と上腸間膜静脈血流が流入し、門脈本幹を経由して肝内へと流れていくが、この2つの血流を分離できないことから、門脈内での走向や肝内分布については評価できないという問題点がある。これを解決し門脈血流の“流れ”を動態評価する手法として前述のTime-SLIPの併用がある。これは、空間選択的インバージョンリカバリーパルスであるTime-SLIPをプレパルスとして脾静脈あるいは上腸間膜静脈の一方に選択的に印加することにより脾静脈血流および上腸間膜静脈血流を分離して画像化し、これら血流の門脈内での分布や走向を生理的な状態で観察する手法である。Time-SLIPは20cm幅を用い、インバージョン時間 (inversion time : TI) を600~700msecとすることで、印加された血管内の血流信号 (例えば上腸間膜静脈血流信号) はこのパルスの効果で抑制され低信号化する。信号が抑制された上腸間膜静脈血流はデータ収集の間に門脈内に流入することから、門脈内の信号低下域として観察され、門脈内における分布域が評価できる。正常成人の門脈内において、上腸間膜静脈血流は門脈本幹の右側壁に沿って流入する頻度が高く、脾静脈血流は門脈本幹の左側壁に沿って流れ、そのまま左門脈枝内へ流入する頻度が高い<sup>10)</sup> (Fig.4)。このことは、門脈本幹内には生理的狀態下において、ある程度の層流が存在することを示唆している。ただし、層流としてみられない症例も存在することから、乱流や渦状流を呈する場合もあると考えられる。この差異が個人差によるものか、他の原因によるものか、不明であるが、脾静脈と上腸間膜静脈の形状や合流形態も要因の1つと思われる。

門脈血流動態は食事摂取の影響を受けることが超音波検査などで知られており<sup>11)</sup>、食後には門脈血流が総和として増加するとされているが、上腸間膜静脈血流、脾静脈血流それぞれの増減についてはわかっていない。Time-SLIPでは上腸間膜静脈血流と脾静脈血流を分離して画像化できるため、食事前後で血流動態の変化を検討してみると、食前では脾静脈血流が門脈本幹内を優位に流れる場合が多かったが、食後では上腸間膜静脈血流が門脈本幹内を優位に流れることが多くなっており、血流の優位性の逆転がみられた<sup>12)</sup>。また食事前後での上腸間膜静脈血流、脾静脈血流それぞれの血流増加についてみたところ、上腸間膜静脈血流はほぼ全例で増加がみられたのに対し、脾静脈血流は増加、変化なし、低下がそれぞれほぼ均等に認められた。このように食事前後では門脈血流動態に大きな変化が生じていることがわかる。

このようにTime-SLIPを併用した非造影門脈血流MRイメージング法は門脈内で絶えず変化する脾静脈血流と上腸間膜静脈血流の相互関係を明らかにでき、生体内での生理的な門脈血流動態の変動を可視化できる可能性が高い<sup>13)</sup>。臨床的には、肝硬変症における肝区域性形態変化の原因の一つとして門脈血流動態の変化が考えられるが、それに脾静脈血流と上腸間膜静脈血流がそれぞれどのように関与しているかを解明する一助となり得るであろう。Time-SLIP法では血流の方向も同定できるため、門脈圧亢進症における側副路の描出に加え、門脈系血管路の流れが順行性か逆行性か、あるいは求肝性か遠肝性かの診断も可能であり、血行動態の把握に有用である。また肝移植の適応や血行再建術の決定など、治療法の選択を含めた臨床面への貢献が期待される。

## 胆膵領域の機能・動態MRイメージング

### (1)Time-SLIP 併用 cine dynamic MRCPによる機能・動態MRイメージング

MRCPは造影剤を使用することなく、主膵管や胆管を描出できることから、膵胆道系疾患のスクリーニングから精密検査まで広く臨床に用いられており、小児においても先天性胆道拡張症、膵胆管合流異常症、膵管癒合不全など先天性疾患の診断に有用であることが報告されている<sup>14)</sup>。MRCP

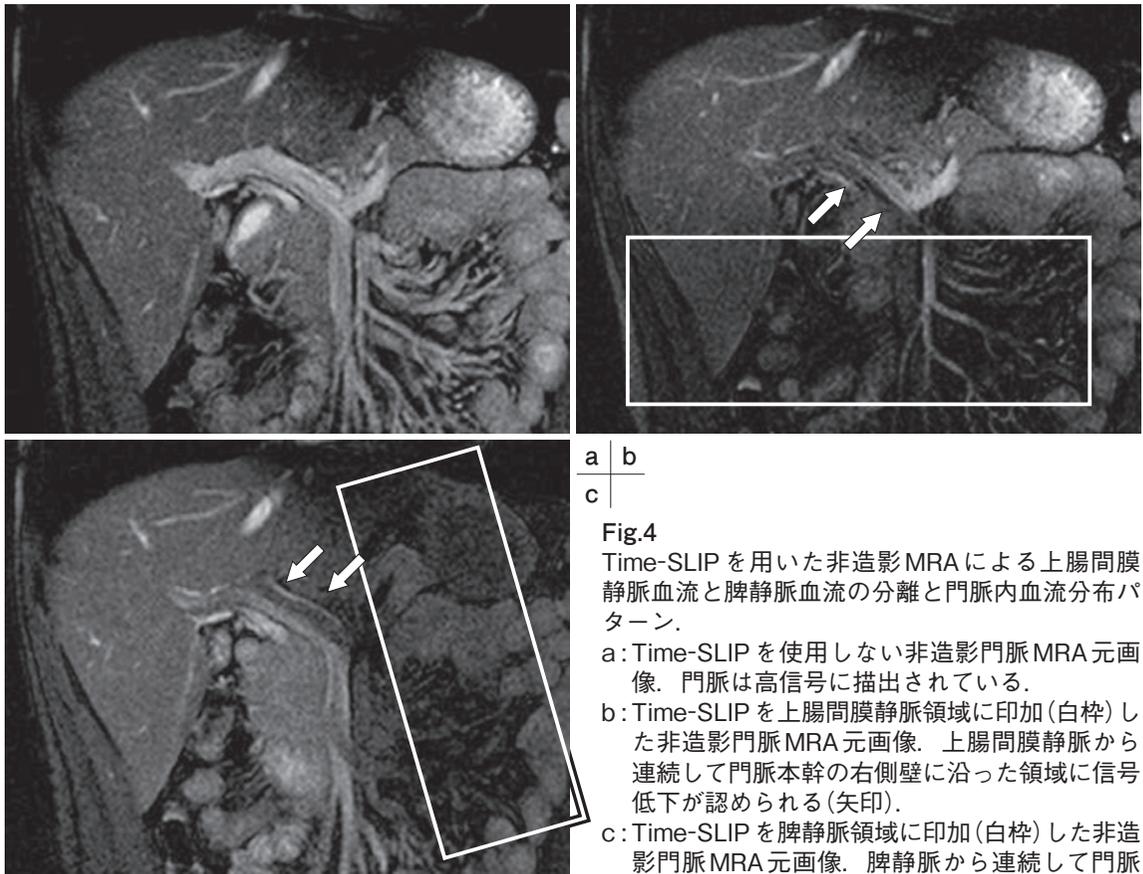


Fig.4

Time-SLIP を用いた非造影MRAによる上腸間膜静脈血流と脾静脈血流の分離と門脈内血流分布パターン.

a: Time-SLIP を使用しない非造影門脈MRA元画像. 門脈は高信号に描出されている.

b: Time-SLIP を上腸間膜静脈領域に印加(白枠)した非造影門脈MRA元画像. 上腸間膜静脈から連続して門脈本幹の右側壁に沿った領域に信号低下が認められる(矢印).

c: Time-SLIP を脾静脈領域に印加(白枠)した非造影門脈MRA元画像. 脾静脈から連続して門脈本幹の左側壁に沿った領域に信号低下が認められる(矢印). このように, 上腸間膜静脈血流と脾静脈血流が門脈内で層流を形成していることがわかる.

は主膵管・胆管内の膵液・胆汁(水成分)を画像化したものであり, 基本的には静止画像である. そのため動態に基づく診断や機能面の診断に用いられることは少ない. セクレチン負荷後MRCPは, 膵外分泌機能の評価や慢性膵炎の診断に有用であることが報告されているが<sup>15~18)</sup>, この方法でも膵液の“流れ”に関しては, 直接, 描出することはできず, 排出動態を評価することはできない. またセクレチンそのものが現在, 国内で使用できないという問題もある. このように, 生理的な膵液の流れを直接描出し<sup>19,20)</sup>, さらに排出動態(排出のタイミングや規則性, 頻度など)を評価する画像診断法はほとんどなかった.

Time-SLIP法は, 前述の通り, 非造影MRAのための手法として開発され発展してきたものであ

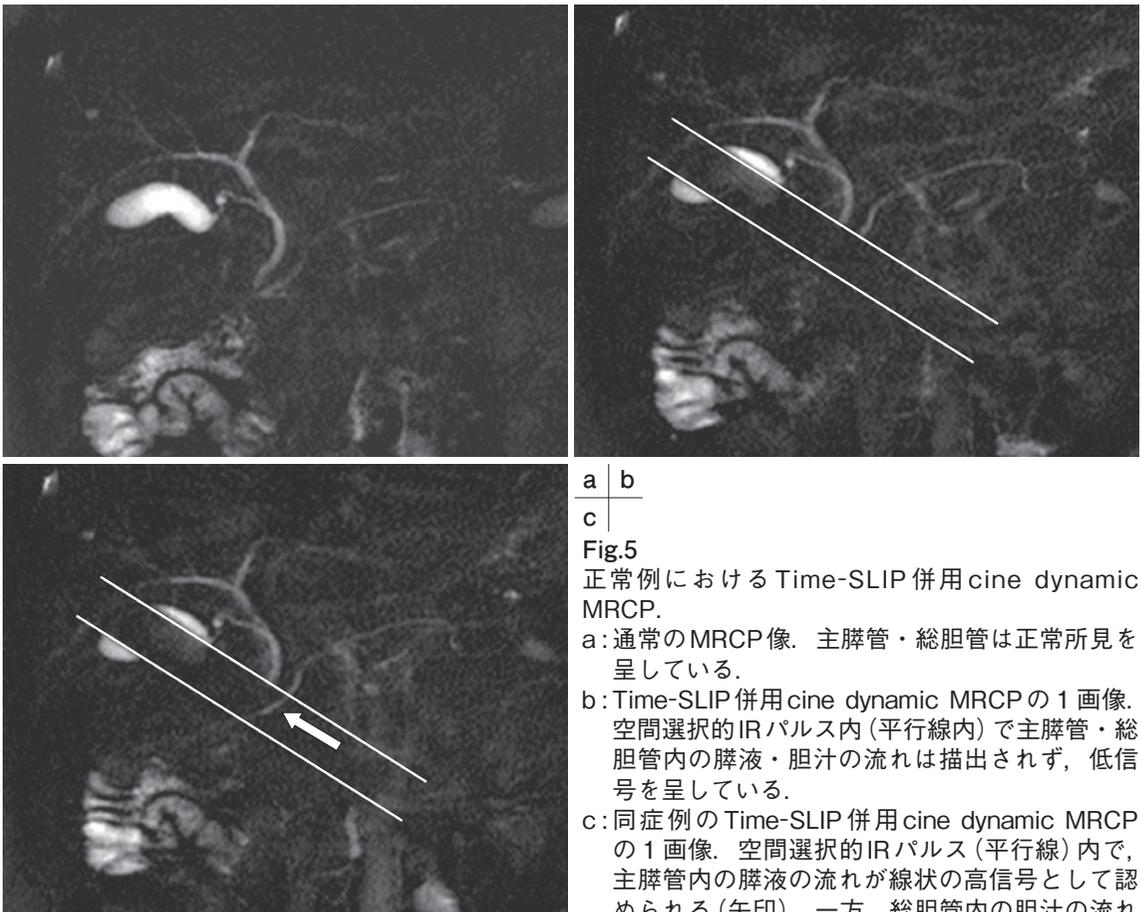
るが, MRCP法と併用することで, 膵液や胆汁の動き(流れ)をとらえることが可能である. まず撮像方法と膵液・胆汁の流れが描出される原理について述べる. Time-SLIP法併用MRCPの撮像には, 成人の場合, 呼吸停止下の2D-thick-slab MRCP法(スライス厚=50mm)を用いる. まず胆管・主膵管の全体像を描出するために, Time-SLIP法を用いない通常の2D-thick-slab MRCP冠状断像を撮像する(Fig.5a). この冠状断MRCP画像を位置決め画像として用い, Time-SLIPの印加部位を決定する. Time-SLIPの幅は20mmとし, 膵頭部近傍で主膵管および総胆管とほぼ直交するように設定する. Time-SLIPはインバージョンリカバリーパルスなので, TI=2200msec程度で水がnull pointとなり, 水信号が抑制される. この条件設定で撮像

を行うと、膵液・胆汁が流れていないタイミングでは、流れのない主膵管・総胆管内の膵液・胆汁はTime-SLIP領域内で信号が抑制され低信号となる (Fig.5b). 一方、膵液・胆汁に流れが生じた場合、Time-SLIP内の主膵管・総胆管内に新たな膵液・胆汁が流入してくるためTime-SLIP領域内で高信号に描出される (Fig.5c). 撮像時間はインバージョンタイムも含めて約4秒で、実際のデータ収集時間は1~2秒である. これまでの小児に対するMRCP適用報告をみると、3秒程度の撮像でアーチファクトの少ない良質で診断可能な画像が得られており<sup>21)</sup>、1回の撮像時間が短いTime-SLIP併用MRCP法は、呼吸停止下の撮像が困難な小児でも、安静呼吸下での撮像で施行可能と思われる. この撮像を繰り返し行う cine dynamic MRCPを行うことで動態診断への応用が可能であ

る. Time-SLIP法併用 cine dynamic MRCPでは4秒間の撮像を15秒間隔で繰り返し、5~10分間で20~40回の連続撮像を行うことで、膵液・胆汁排出の頻度や排出タイミングが評価できる<sup>22)</sup>.

(2)Time-SLIP併用 cine dynamic MRCPによる膵液排出動態の画像診断

膵外分泌機能が正常に保たれている場合 (高齢者は除く)、Time-SLIP併用 cine dynamic MRCP (10分間で連続40回撮像)により、膵液の生理的排出はほぼ全例において描出され、膵液の流れる方向は全例で膵尾側から膵頭側方向であり、逆流はみられなかった. 膵液排出の描出頻度は、40回中25~37回で、平均31.4回であったが<sup>22)</sup> (Fig.5c)、排出タイミングに規則性はなく、同一症例においても連続して排出されるときもあれば、排出と排



a | b  
c |

**Fig.5**  
正常例におけるTime-SLIP併用 cine dynamic MRCP.

- a: 通常のMRCP像. 主膵管・総胆管は正常所見を呈している.
- b: Time-SLIP併用 cine dynamic MRCPの1画像. 空間選択的IRパルス内 (平行線内) で主膵管・総胆管内の膵液・胆汁の流れは描出されず、低信号を呈している.
- c: 同症例のTime-SLIP併用 cine dynamic MRCPの1画像. 空間選択的IRパルス (平行線) 内で、主膵管内の膵液の流れが線状の高信号として認められる (矢印). 一方、総胆管内の胆汁の流れは描出されていない.

出なしが交互に現れるときもあった。また膵液が20mm幅のTime-SLIP内を流れた距離を5段階(grade 0:流れなし, grade 1:1~5mm未満, grade 2:5~10mm, grade 3:11~15mm, grade 4:16mm以上)に分けて検討すると、平均grade:2.41であった。この結果から、正常人では膵液排出はかなり頻回に行われていると考えられるが、膵液の排出が描出されるタイミングは不規則で、流れる距離も一定ではなく、正常膵液の排出が間欠的で不規則であることを示唆している。膵外分泌機能を評価する際には、膵液量のほか、アミラーゼ分泌量、リパーゼ分泌量や重炭酸塩濃度なども重要な要素である。Time-SLIP併用 cine dynamic MRCPでは大まかな膵液量を評価していることになり、膵外分泌機能そのものを評価することにはならないが、これらの要素の増減には相関があることから、Time-SLIP併用 cine dynamic MRCPを膵外分泌機能評価法として代用することは可能と思われる。膵外分泌機能は加齢とともに変化してくることが知られている<sup>23)</sup>。小児の膵外分泌機能に関する報告はそれほど多くないが、膵液分泌量は年齢とともに増加し40歳前後でピークを迎え、その後、徐々に低下し、60~65歳以上では著明に低下すると報告されている。Time-SLIP併用 cine dynamic MRCPでも同様な膵液排出パターンを示すことが確認されている。

一方、膵疾患とくに膵炎などの外分泌機能に影響を及ぼすような病態では、膵液の排出動態に変化が生じることが考えられる。急性膵炎ではTime-SLIP併用 cine dynamic MRCPにて膵液排出の描出頻度は正常例と比較して有意に低下する。このことから急性膵炎では一時的な膵外分泌機能障害による膵液の排出量や流速の低下がおこっていることが推察される。慢性膵炎症例では、膵線維化に伴う慢性的な膵外分泌機能の低下を反映して、膵液排出頻度が低下する。通常のMRCPで主膵管・分枝膵管の拡張を伴うような症例では、膵液の流れはほとんど観察されず、膵液の排出能(生産能)が著しく低下していると考えられる。一方、主膵管の拡張がほとんどなく、通常のMRCPではほぼ正常の主膵管所見を呈する早期慢性膵炎症例でも膵液の排出頻度が低下しており、Time-SLIP併用 cine dynamic MRCPは慢性膵炎の早期診

断における補助的役割を果たせる可能性があると思われる。また膵液排出頻度や流れた距離を評価することで膵外分泌機能の重症度判定に応用できる可能性もある。膵管内乳頭粘液性腫瘍(IPMN)を合併している場合には、主膵管内に腫瘍から産生された粘液が排出されるため膵液の流れそのものが悪くなり、膵外分泌機能低下がなくてもTime-SLIP併用 cine dynamic MRCP上で、膵液排出頻度の低下や膵液の流れる距離が小さくなり、膵外分泌機能を過小評価してしまう恐れがあるため注意を要する。

急性膵炎を有する小児例ではMRCPにて先天性胆道拡張症や膵胆管合流異常症の合併頻度が高いことが知られている<sup>14)</sup>。これは合流異常により膵液と胆汁が相互に逆流し膵炎や胆管炎を引き起こすためと考えられる。Time-SLIP併用 cine dynamic MRCPでは合流異常に伴う膵液や胆汁の相互逆流を直接可視化できる可能性があり、確定診断および治療方針の決定に役立つものと考えられる。

### (3)Time-SLIP併用 cine dynamic MRCPによる胆汁排出動態の評価

肝内で産生された胆汁は肝外胆管を通過して十二指腸へ排出されるため、Time-SLIP併用 cine dynamic MRCPは肝外胆管内における胆汁の流れ(排出)の描出にも応用可能であるが、膵液の排出ほど明瞭な胆汁の流れ(排出)は観察されない。観察されたとしても胆管内で胆汁の流れる距離は短い場合が多い。これは胆汁の流れが膵液の流れと比較して遅いことが原因と思われる。また胆汁の流れる方向に関して、多くの正常例において、胆汁の流れの方向は膵液と異なり、順行性に肝門側から十二指腸乳頭部側へ流れる場合と、逆行性に十二指腸乳頭部側から肝門側へ流れる場合がみられる(Fig.6)。これは膵管内圧と比較して、肝外胆管内圧はそれほど高くないため、乳頭括約筋の弛緩時には順行性に、収縮時には逆流するものと思われる。逆流現象については胆汁の流れを緩衝する役割を果たすであろう胆嚢の存在も考慮する必要があり、胆摘後の胆汁排出動態に関する新たな知見が得られるかもしれない。

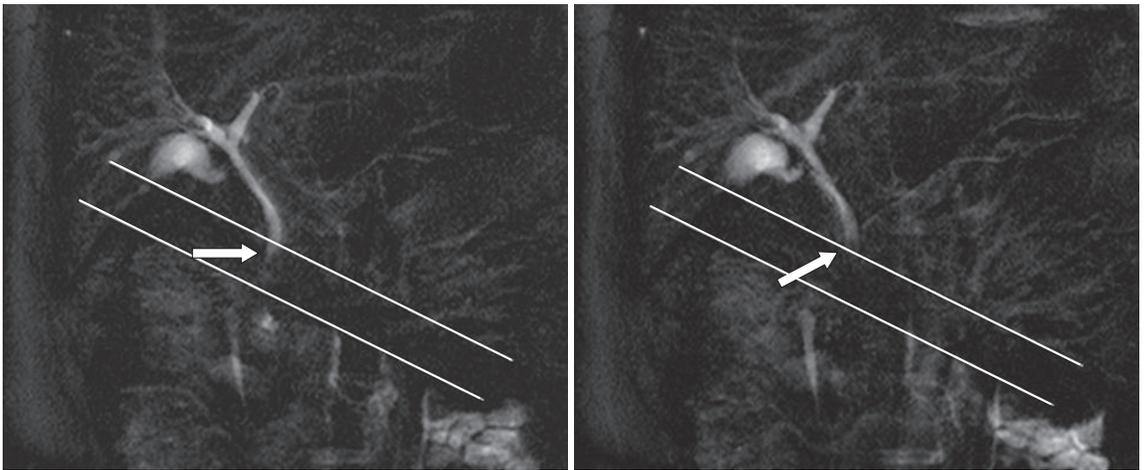


Fig.6 正常例における Time-SLIP 併用 cine dynamic MRCP.

- a: Time-SLIP 併用 cine dynamic MRCP の 1 画像. 空間選択的 IR パルス内 (平行線内) で, 総胆管内の胆汁はわずかに順行性に流れているのが描出されている (矢印).
- b: 同症例の Time-SLIP 併用 cine dynamic MRCP の 1 画像. 空間選択的 IR パルス (平行線内) から頭側に向かって, 総胆管内に低信号域が描出されており (矢印), 逆行性の胆汁の流れと考えられる.

a | b

## まとめ

腹部領域における機能・動態 MR イメージングについて Time-SLIP 法の応用を中心に述べた. Time-SLIP 法を併用した非造影門脈血流動態 MR イメージングでは門脈内で絶えず変化する脾静脈血流と上腸間膜静脈血流の相互関係を明らかにでき, 生体内での門脈血流動態の変化を解明する一助となりうる. Time-SLIP 併用 cine dynamic MRCP 法では膵液・胆汁をラベリングすることで, 膵液・胆汁の流れを画像化し, 膵液・胆汁排出動態を評価することが可能であり, 膵外分泌機能評価の新たな指標として臨床的に有用な手法となりうる可能性が示唆された. このように機能・動態イメージングは, 形態診断ではわからなかった新たな診断情報をもたらすものであり, 今後, 簡便で汎用性の高いソフトウェアの開発がさらなる画像診断技術の発展に寄与することが期待される.

## ●文献

- 1) Higaki A, Tamada T, Sone T, et al : Potential clinical factors affecting hepatobiliary enhancement at Gd-EOB-DTPA-enhanced MR imaging. *J Magn Reson Imaging* 2012 ; 30 : 689-693.
- 2) Noworolski SM, Lam MM, Merriman RB, et al : Liver steatosis: concordance of MR imaging and MR spectroscopic data with histologic grade. *Radiology* 2012 ; 264 : 88-96.
- 3) Chmelik M, Schmid AI, Gruber S, et al : Three-dimensional high-resolution magnetic resonance spectroscopic imaging for absolute quantification of  $^{31}\text{P}$  metabolites in human liver. *Magn Reson Med* 2008 ; 60 : 796-802.
- 4) Yamamoto A, Zhang JL, Rusinek H, et al : Quantitative evaluation of acute renal transplant dysfunction with low-dose three-dimensional MR renography. *Radiology* 2011 ; 260 : 781-789.
- 5) Hagspiel KD, Leung DA, Angle JF, et al : MR angiography of the mesenteric vasculature. *Radiologic clinics of North America* 2002 ; 40 : 867-886.
- 6) Broome DR : Nephrogenic systemic fibrosis associated with gadolinium based contrast agents : a summary of the medical literature reporting. *Eur J Radiol* 2008 ; 66 : 230-234.
- 7) Abraham JL, Thakral C : Tissue distribution and kinetics of gadolinium and nephrogenic systemic fibrosis. *Eur J Radiol* 2008 ; 66 : 200-207.
- 8) Miyazaki M, Lee VS : Nonenhanced MR angiography. *Radiology* 2008 ; 248 : 20-43.

- 9) Ito K, Koike S, Shimizu A, et al : Portal venous system : evaluation with unenhanced MR angiography with a single-breath-hold ECG-synchronized 3D half-Fourier fast spin-echo sequence. *AJR Am J Roentgenol* 2008 ; 191 : 550-554.
- 10) Ito K, Koike S, Jo C, et al : Intraportal Venous Flow Distribution : Evaluation with Single Breath-Hold ECG-Triggered Three-Dimensional Half-Fourier Fast Spin-Echo MR Imaging and a Selective Inversion-Recovery Tagging Pulse. *AJR Am J Roentgenol* 2002 ; 178 : 343-348.
- 11) Dazat M, Lafortune M, Patriquin H, et al : Meal induced changes in hepatic and splanchnic circulation : a noninvasive Doppler study in normal humans. *European journal of applied physiology and occupational physiology* 1994 ; 68 : 373-380.
- 12) Tsukuda T, Ito K, Koike S, et al : Pre- and postprandial alterations of portal venous flow : evaluation with single breath-hold three-dimensional half-Fourier fast spin-echo MR imaging and a selective inversion recovery tagging pulse. *J Magn Reson Imaging* 2005 ; 22 : 527-533.
- 13) Ito K, Shimizu A, Tsukuda T, et al : Evaluation of intraportal venous flow distribution by unenhanced MR angiography using three-dimensional fast spin-echo with a selective tagging pulse : efficacy of subtraction of tag-on and tag-off images acquired during a single breath-hold. *J Magn Reson Imaging* 2009 ; 29 : 1224-1229.
- 14) Hirohashi S, Hirohashi R, Uchida H, et al : Pancreatitis : evaluation with MR cholangiopancreatography in children. *Radiology* 1997 ; 203 : 411-415.
- 15) Manfredi R, Costamagna G, Brizi MG, et al : Severe chronic pancreatitis versus suspected pancreatic disease: dynamic MR cholangiopancreatography after secretin stimulation. *Radiology* 2000 ; 214 : 849-855.
- 16) Punwani S, Gillams AR, Lees WR : Non-invasive quantification of pancreatic exocrine function using secretin-stimulated MRCP. *Eur Radiol* 2003 ; 13 : 273-276.
- 17) Balci NC, Alkaade S, Magas L, et al : Suspected chronic pancreatitis with normal MRCP : findings on MRI in correlation with secretin MRCP. *J Magn Reson Imaging* 2008 ; 27 : 125-131.
- 18) Sanyal R, Stevens T, Novak E, et al : Secretin-enhanced MRCP : review of technique and application with proposal for quantification of exocrine function. *AJR Am J Roentgenol* 2012 ; 198 : 124-132.
- 19) 杉田礼児, 藤田直孝, 清水誓子, 他 : Time-SLIP併用FASE法による膵液の流れの描出について. *日本医放会誌* 2010 ; 28 (抄録) : 3.
- 20) Hellund JC, Storaas T, Gjesdal KI, et al : Magnetic resonance-assisted imaging of slow flow in the pancreatic and common bile duct in healthy volunteers. *Acta Radiol* 2007 ; 48 : 943-947.
- 21) Kuwatsuru R, Yamataka A, Irimoto M, et al : [2D-FASE MRCP for pediatrics with congenital biliary dilatation: usefulness of non-breath-hold one-shot MRCP]. *Nihon Igaku Hoshasen Gakkai zasshi* 58 : 807-810.
- 22) Ito K, Torigoe T, Tamada T, et al : The secretory flow of pancreatic juice in the main pancreatic duct : visualization by means of MRCP with spatially selective inversion-recovery pulse. *Radiology* 2011 ; 261 : 582-586.
- 23) Ishibashi T, Matsumoto S, Harada H, et al : Aging and exocrine pancreatic function evaluated by the recently standardized secretin test. *Jpn J Geriatr* 1991 ; 28 : 599-605.