

# 肝切除術シミュレーション その基礎と臨床応用

Hepatectomy Simulation  
Its Fundamentals and Clinical Application

三浦 行矣 <sup>1)</sup>	Koui Miura	中尾 宣夫 <sup>1)</sup>	Norio Nakao
金 武男 <sup>1)</sup>	Wunan Jin	坂本 清 <sup>2)</sup>	Kiyoshi Sakamoto
吉本 敦史 <sup>1)</sup>	Atushi Yoshimoto	山中 潤一 <sup>3)</sup>	Jyunichi Yamanaka
宮本 義也 <sup>1)</sup>	Yoshiya Miyamoto	斎藤 慎一 <sup>3)</sup>	Sinichi Saitou
長見 ゆき <sup>1)</sup>	Yuki Nagami	藤元 治朗 <sup>3)</sup>	Jirou Fujimoto
廣田 省三 <sup>1)</sup>	Syouzou Hirota	永尾 朋洋 <sup>4)</sup>	Tomohiro Nagao

<sup>1)</sup> 兵庫医科大学 放射線科

<sup>2)</sup> 兵庫医科大学病院 中央放射線部

<sup>3)</sup> 兵庫医科大学 第1外科

<sup>4)</sup> 株式会社日立メディコ 技術研究所

外科切除を目的とするHCC症例に対し、arterial CTより門脈・肝静脈・腫瘍・肝実質の3D画像を求め、ワークステーション上で統合化(Fusion imaging)し、肝virtual realityとした。この肝virtual reality上で、著者らが開発したauto segmentation法を用い、担癌区域・亜区域門脈枝の還流支配領域を設定し、肝区域・亜区域切除術と同様の操作を行った。すなわち、肝virtual realityの表面からの観察はグリソン一括処理による領域のマーキングに、またauto segmentation法で設定された領域は切除肝に、そしてその境界面は実際の切離断端面に、相当した。肝切除術シミュレーションは、術前にTw、切除率を計算することが可能で、確実かつ安全な治療法が選択でき、さらに術前に術中の切離面上での脈管処理に関する情報を正確に与え、術式の遂行に迅速性と正確さを保証することができ、臨床上有用である。

For HCC with cirrhosis that require surgical resection, 3D images of portal vein, hepatic veins, tumor and hepatic parenchyma were acquired by arterial CT, and their fusion imaging was performed on the workstation to display liver virtual reality. On this liver virtual reality, clipping the portal branch to segment, the segment involved the tumor was defined by using Auto segmentation method, and the operation same as hepatic resection was performed. That is, the observation from the surface of the liver virtual reality, the region defined by Auto segmentation method and its border surface corresponded to the marking after the clamping of the portal pedicle to segment, the resected liver and the actually parenchymal transection plane respectively.

In hepatectomy simulation, Tw and excision rate can be calculated, and accurate and safe surgical method can be selected. Furthermore, information for handling vessels on the parenchymal transection plane during surgical operation can be accurately given prior to performing operation, thereby speediness and accuracy in performing operation can be assured and this method is clinically useful.

**Key Words:** Simulation, Auto Segmentation, Fusion Imaging, Segmentectomy, HCC

## 1. はじめに

グリソン鞘一括処理に基づく肝区域・亜区域切除術は外科手術のなかでも極めて合理的で、形式美を備えた術式の一つである。この術式は大きく分けて二つの工程から成り立っている<sup>1)</sup>。一つは、グリソン鞘を結紮した時に肝表面に生じる色調の変化の範囲をマーキングすることである。二つめは、処理されたグリソン鞘の支配領域の境界面を同定し、切離断端面を作成することである。

著者らは以前よりCTAP、CTAで作成した肝実質・腫瘍部・門脈・肝静脈の3D-CT画像をワークステーション上で統合させ、この統合3D画像(Fusion imaging)を用い腫瘍流出静脈の研究を行ってきたが、同時にこの統合3D画像を肝virtual realityとして外科でいうグリソン鞘一括処理に基づく肝切除術シミュレーションが作成できないかを考えていた。その際一番大きな問題点は、指定された門脈枝の還流支配領域

の境界設定を自動的に抽出できるアルゴリズムを開発することであった。この問題が解決できれば、肝 virtual reality 上で門脈枝をクリッピング(結紮)することにより、その門脈枝の還流支配領域を抽出し、仮想肝の表面上で、領域の範囲をマーキングすることができるであろうし、また作成された領域を取り除くことにより、仮想切離断断面を作成することが可能となる。こうしたコンピュータ上での作業は、肝系統的区域・亜区域切除術の基本的な二つの工程を肝 virtual reality 上で再現したことになり、肝切除術のシミュレーションとして妥当であることを示している。

肝切除術シミュレーションは臨床上、いくつかの点で有用である。まず術前に切除率を正確に計算することができるため、残肝肝機能を正確に評価することが可能で、安全な術式選択に寄与する。また仮想切除肝を多方向から観察し距離値計算が可能なことにより、術前に surgical margin を正確に評価することができ、確実な抗腫瘍効果をもたらす術式を選択することができる。さらに肝切除術シミュレーションは、仮想切離面の観察と距離値計測により術前に、術中に処理すべき肝静脈枝、およびグリソン鞘を同定することが可能で、手術の迅速性、安全性を保障する。

今回指定門脈枝の還流支配領域の境界を設定するアルゴリズムを開発し<sup>2)</sup>、肝切除術シミュレーションを実際のHCCの肝切除術症例に臨床応用したので、症例を呈示する中で肝切除術シミュレーションを解説し、その臨床の有用性と、今後改良すべき問題点を明らかにする。

## 2. 方法

### 2.1 使用機器と撮影条件

使用したCT機器は日立 W2000である。画像解析装置は、ワークステーションSun Ultra 1に日立メディコと共同開発中の三次元画像処理ソフトを用いた。

肝動脈CTは固有肝動脈にカテーテルを挿入し、150mgI/mlの非イオン性造影剤を1ml/秒、計36ml注入して、早期相は注入開始6秒後より、後期相は50秒後より全肝を頭側から連続撮影する。門脈CTは、上腸間膜動脈にカテーテルを挿入し、370mgI/mlの非イオン性造影剤を2ml/秒、計30ml注入し、注入開始14秒後より全肝を頭側から連続撮影する。肝静脈CTは、上腸間膜動脈にカテーテルを挿入し、370mgI/mlの造影剤を2ml/秒、計40ml注入し、注入開始44秒後に頭側から撮影する。

撮影条件は、いずれもスライス厚5mm、テーブル移動5mm/秒、画像再構成間隔2mmである。肝実質、腫瘍部、門脈、肝静脈の3D像は、それぞれのCT像の再構成間隔2mmのaxial像をもとに、ワークステーションSun Ultra 1上でvolume rendering法にて作成した。門脈ならびに肝静脈はregion growing法<sup>3)</sup>で抽出した。肝実質3D像、腫瘍3D像、門脈3D像、肝静脈3D像の統合3D画像(Fusion imaging)は日立メディコと共同開発中の三次元画像処理ソフトを用いワークステーション上で作成した。

### 2.2 auto segmentation 法<sup>2)</sup>

指定した門脈枝の還流支配領域を自動的に抽出する auto segmentation法は次の三つの工程より成り立っている。

- (1)門脈各枝の重心線を計算
  - (2)門脈各枝の還流支配境界面の設定
  - (3)門脈枝クリッピングポイントの指定
- 以下各項について簡単に説明する。

(1)門脈各枝の重心線の計算は細線化処理と称し、図1の如く、まずregion growing法で抽出された門脈データの芯線画素を計算する。そしてユークリッド距離値計算を用い芯線画素上で、各点での門脈の血管径を求める。図2はregion growing法で抽出した門脈3D像で、図3はこれを細線化処理した画像である。

(2)門脈各枝の還流支配境界面の設定は、重心線画像より門脈枝相互の相対的距離を計算し、血管径の比を利用して、各門脈の間に支配領域境界面を設定する(図4)。この定義は、単純な系で考えた場合、還流領域は血流量に、そして血流量は血管径に比例するであろう、という経験則に基づいている。図5は、細線化画像から門脈支配領域設定の流れを図示したものである。



図1：重心線の設定(細線化処理)



図2：門脈3D画像



図3：細線化処理画像

③各門脈枝の指定、いわゆるクリッピングポイントの指定は、各門脈枝の分岐点(クリッピング)を指定し、さらに血管の走行方向を同定する点を三次元的に与え、区域枝を特定する(図6)。たとえば図7の如く、門脈前区域枝の起始部をクリッピングポイントに選べば、前区域枝の還流支配領域が表示される。

### 3. 肝切除術シミュレーションの具体的展開

症例は69歳の男性である。他院にて超音波検査で肝S<sub>7</sub>に径25mm大の腫瘤を指摘され、精査加療目的にて当院第一外科入院となった。

入院時血液生化学検査では、総蛋白7.6g/dl、アルブミン3.6g/dl、総ビリルビン値0.6mg/dl、AST 82U/l、ALT 94U/l、ICG15分値20% HCV(+)、AFP 993ng/ml、PIVKA 3270 mAU/ml。血管造影下CTが施行された(図8)。CTAPで、S<sub>7</sub>にPerfusion defectを認め、RHA-CTの早期相で腫瘍辺縁部と内部は不均一にenhanceされ、後期相で内部はwash outされた。染まりのパターンは典型的なHCCとは言い難いが、C型肝炎でAFP、PIVKA が上昇していることより、HCCと診断した。外科側の術前検討では肝内転移巣が認められず、後区域切除(切除率36.6%)が予定された。

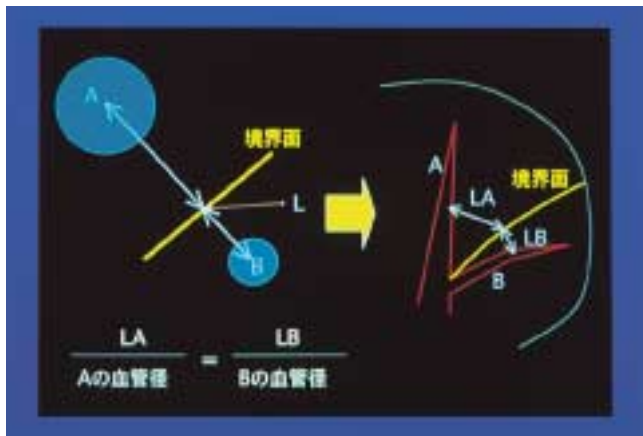


図4：還流支配領域境界面の設定



図6：アルゴリズム

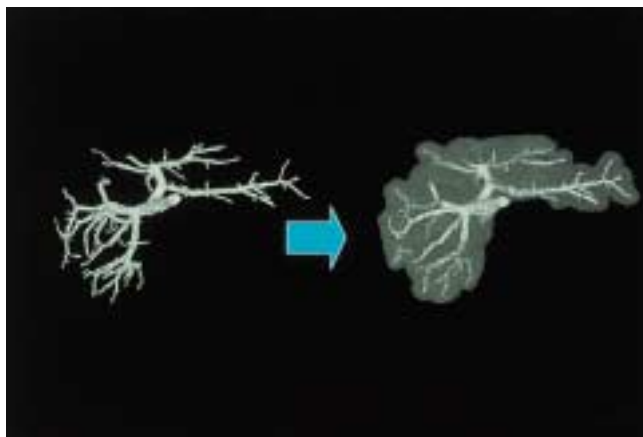


図5-a

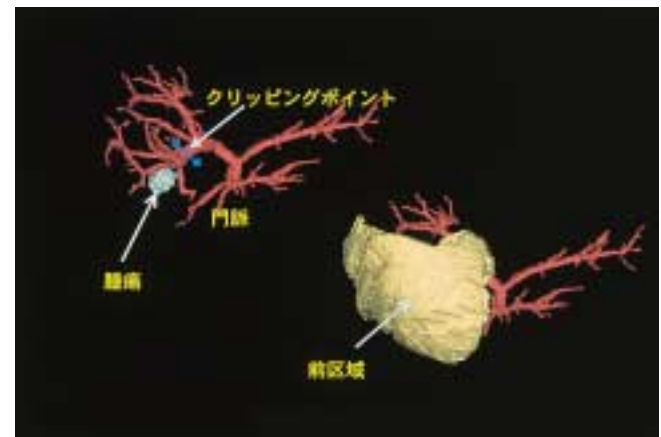


図7：門脈前区域枝をクリッピングした時の還流支配領域

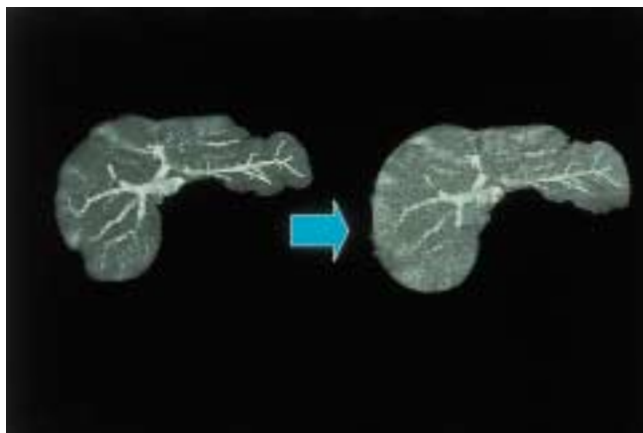


図5-b

図5：門脈支配領域設定の流れ

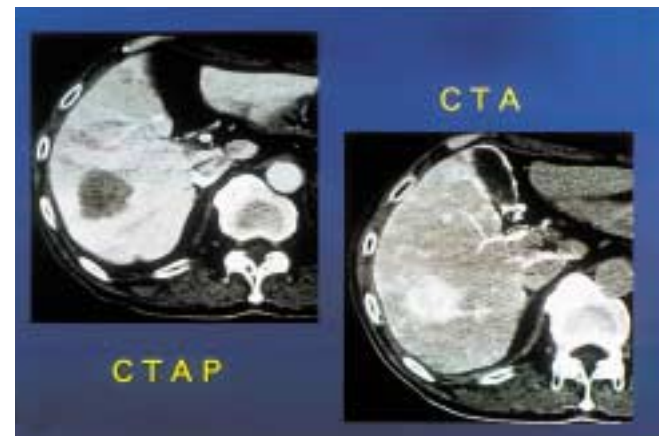


図8：肝硬変合併肝細胞癌。S<sub>7</sub>切除・S<sub>8</sub>部分切除術施行症例



この症例に肝切除術シミュレーションが適用された。CTAP、CTAから肝実質、腫瘍部、門脈、肝静脈の統合3D画像(Fusion imaging)を作成し、肝virtual realityとする(図9-a)。この肝virtual realityを透明化すると、実質部、腫瘍部、門脈、肝静脈が描出されてくる(図9-b)。さらに透明化していくと実質部分が消去され、腫瘍、門脈、肝静脈の統合3D画像となる(図9-c)。この肝virtual reality上で肝切除術シミュレーションを適用する。

まず門脈3D画像上でP<sub>7</sub>起始部をクリッピングする(図10-a)。auto segmentation法でP<sub>7</sub>門脈枝の還流支配領域がS<sub>7</sub>領域として設定され、この領域を肝表面上で観察すると、青色で表示される(図10-b)。透明化した統合3D画像を観察すると、明らかに腫瘍部の腹側の大部分はS<sub>7</sub>領域外である(図10-c)。腫瘍部を含めた仮想S<sub>7</sub>切除像では腫瘍部の腹側はsurgical marginがとれず(図10-d)、この場合の術式はS<sub>7</sub>切除術+核出術という形になる。

そこで次にP<sub>7</sub>起始部と腫瘍の腹側に関するP<sub>8</sub>分枝の二本とをクリッピングした(図11-a)。P<sub>7</sub>門脈枝とP<sub>8</sub>分枝の二本

の門脈枝の還流支配領域をauto segmentation法を用い設定し、肝表面上でS<sub>7</sub>、S<sub>8</sub>の領域を青色で表示した(図11-b)。auto segmentation法で領域設定した統合3D画像を透明化し、観察すると、腫瘍の大部分は領域内に含まれているが、外側・足側の一部分は領域外であることがわかる(図11-c)。シミュレーション上のS<sub>7</sub>切除ならびにS<sub>8</sub>の部分切除した時の仮想切離面には、黄色で表示される腫瘍部が一部取り残されている(図11-d)。

さらにP<sub>7</sub>起始部と二本のP<sub>8</sub>分枝、およびP<sub>6</sub>分枝の一本をクリッピングした(図12-a)。auto segmentation法で抽出される各門脈枝の還流支配領域が肝表面上で、青色に表示されている(図12-b)。この肝表面上にみられる青色の領域設定は、実際の肝切除術のマーキングの工程に相当する。

この場合の仮想切除領域を透明化した肝virtual realityで観察すると、腫瘍部は仮想切除領域に十分含まれている(図12-c)。また黄色で表示される腫瘍部は、仮想切離断面に認められず、腫瘍部は確実に切除されていることが分かる(図12-d)。

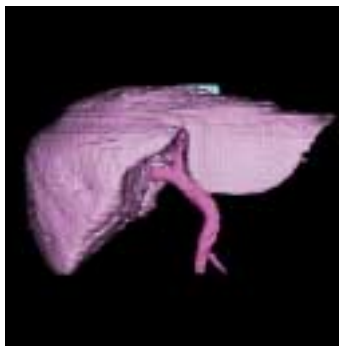


図 9-a

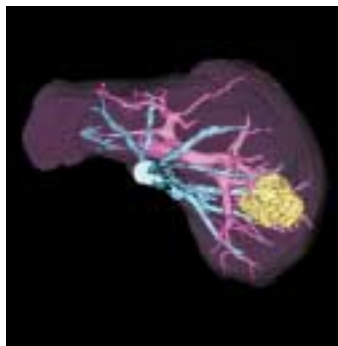


図 9-b

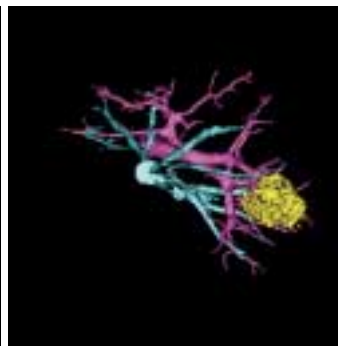


図 9-c



図 10-a

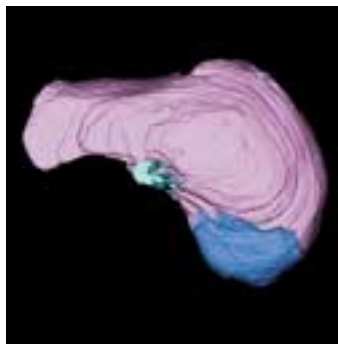


図 10-b

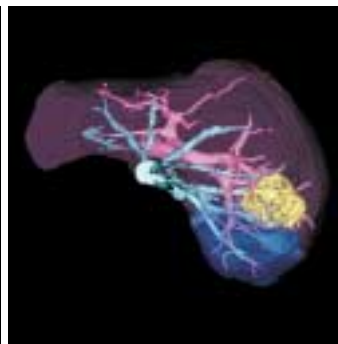


図 10-c

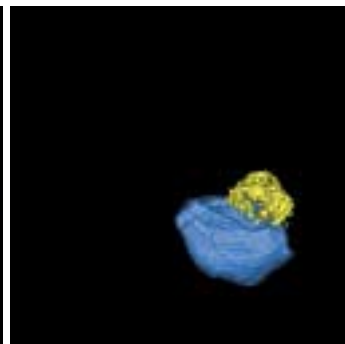


図 10-d



図 11-a

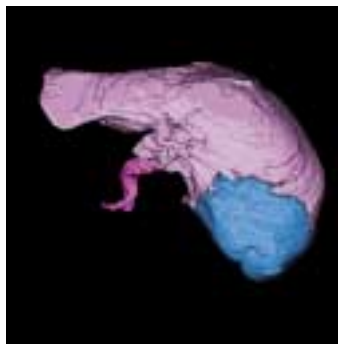


図 11-b

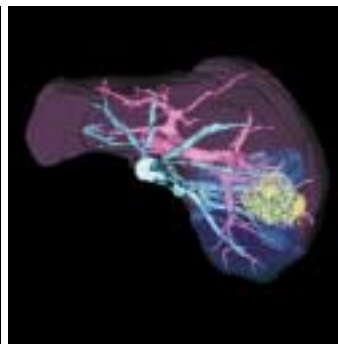


図 11-c

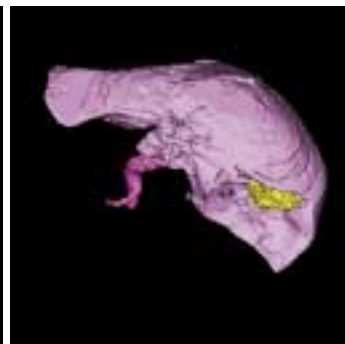


図 11-d

仮想肝切除率は36.2%で、当院第一外科の肝切除術の適応基準を十分に満たしており、S<sub>7</sub>切除術とS<sub>8</sub>・S<sub>6</sub>部分切除術は肝切除術シミュレーションから導き出される適正な術式となる。

では実際の外科手術はどのように行われたのであろうか。外科側の手術記載によれば、S<sub>7</sub>切除プラスS<sub>8</sub>部分切除術が施行されている。そうなると肝切除術シミュレーションが要請したS<sub>7</sub>切除術プラスS<sub>8</sub>・S<sub>6</sub>部分切除術は、S<sub>6</sub>部分切除という過剰切除を要求したことになる。この食い違いを検討するために、実際に行われた肝切除術の切離面と肝切除術シミュレーションで作成した仮想切離面とを比較してみる。図12-eは、S<sub>7</sub>切除術プラスS<sub>8</sub>・S<sub>6</sub>部分切除術シミュレーション後の仮想切離面であるが、P<sub>7</sub>起始部、P<sub>8</sub>分枝、P<sub>6</sub>分枝のクリッピングポイントおよび右肝静脈分枝の仮想断端部がきちっと描出されている。さらにS<sub>7</sub>とS<sub>6</sub>との境界を走行する右下肝静脈が切離面に露出しているのがわかる。一方外科が記載した手術所見のスケッチで実際の肝切除術の切離面をみると、P<sub>7</sub>グリソ

ンとP<sub>8</sub>分枝の二本のグリソン、右肝静脈分枝の断端が表示されている(図13)。

ところで図12-aをステレオ視するとクリッピングしたP<sub>8</sub>の細い分枝は、P<sub>8</sub>の径の太い分枝の起始部より分岐しており、手術所見のスケッチで記載されているP<sub>8</sub>分枝の二本のグリソンの距離は離れすぎていることが分かる。つまり外科医は、腫瘍部の足側・外側部でsurgical marginが十分に取れるように処理したP<sub>6</sub>分枝のグリソンを、P<sub>8</sub>分枝のグリソンの一つと見違えたものと思われる。結局のところ外科医は非常に優秀であったので、動物的勘を働かせながら無意識に、この腫瘍に対する適正な治療法であるS<sub>7</sub>切除術プラスS<sub>8</sub>・S<sub>6</sub>部分切除術に辿り着くことができたが、外科医の羅針盤はコロンブスのアメリカ大陸発見のようにP<sub>6</sub>をP<sub>8</sub>と思い込んでいたのである。

切除標本の断面像(図14)と仮想切除肝のMPR像(図12-f)とを比較すると、ほぼ類似の形状をしていることが分かる。実測のTWは5mmで、仮想TWは4mmであった。



図 12-a

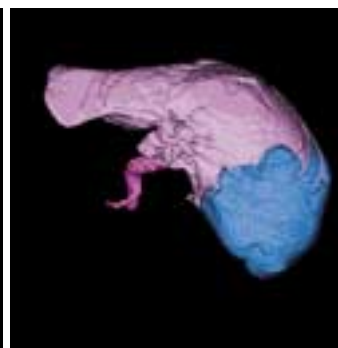


図 12-b

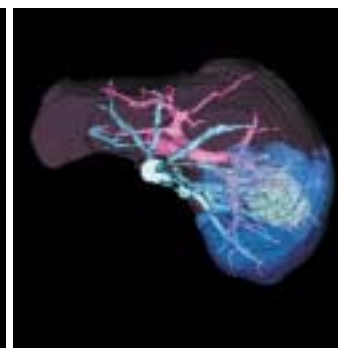


図 12-c

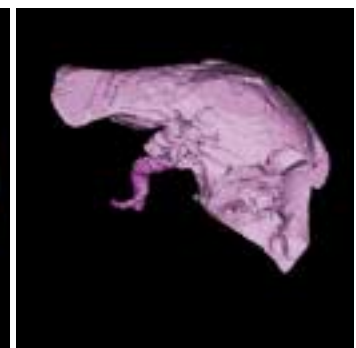


図 12-d

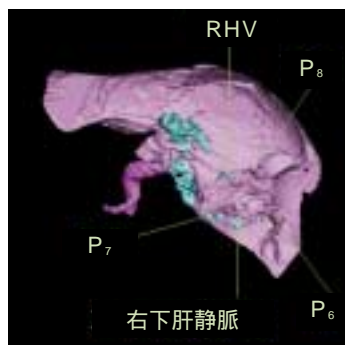


図 12-e : 仮想切離面

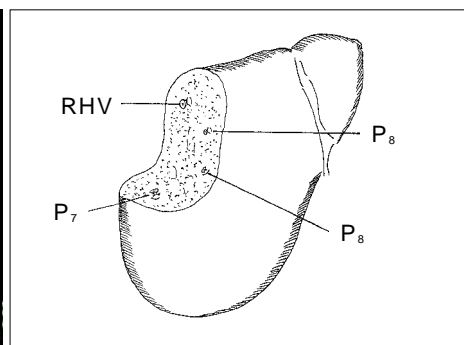


図 13 : S<sub>7</sub>切除・S<sub>8</sub>部分切除の切離面のスケッチ

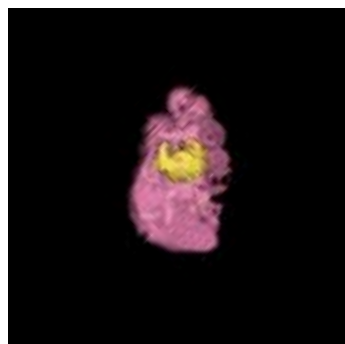


図 12-f : 仮想切除肝の断面

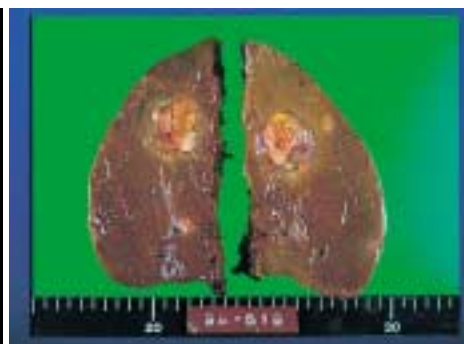


図 14 : 病理標本

## 4. 考案

コンピュータ上で肝切除術を考える肝切除術シミュレーションの場合はまず現実の肝臓に対応する門脈・肝静脈・肝実質・腫瘍の位置情報を正確に内蔵した肝 virtual reality、つまり門脈・肝静脈・肝実質・腫瘍の統合3D画像(Fusion imaging)を使用する。

著者らは既に、この肝 virtual reality を用い、門脈、肝静脈の分岐様式の研究や、腫瘍流出静脈の研究を行ってきた<sup>4)5)6)</sup>。

肝切除術シミュレーションとは、この肝 virtual reality 上で肝切除術と同等な工程を再現させること、つまり担癌区域・亜区域門脈枝の還流支配領域を設定することである。コンピュータ上で、担癌区域・亜区域門脈枝の還流支配領域をどのように設定するかは非常に難しい問題であるが、最近著者らは auto segmentation 法と呼ばれる門脈枝の還流支配領域の設定のアルゴリズムを開発した。

このアルゴリズムにより肝切除術シミュレーションは実際の肝切除術の基本工程を肝 virtual reality 上で忠実に展開することが可能となり、臨床応用されるようになってきた。

肝切除術シミュレーションの臨床的有用性としては、次の4点が挙げられる。

- (1)術前に一つの術式の切除容積、切除率、Twを表示することができることより、肝切除術の適応基準を考慮していくつかの術式のオプションを、適正度の順位をつけて外科医に与えることができる。
- (2)仮想切離面上で、肝静脈、グリソンの処理断端の位置情報を正確に表示することができることより、術前に術中の脈管処理の情報を与え、手術の迅速性と正確さを保証する。
- (3)実際に施行された術式の妥当性は、肝切除術シミュレーションから導かれた適正術式を基準とすることにより客観的に評価できる。また手術手順も仮想切離面上での脈管処理と対比させることにより、科学的評価が可能である。
- (4)若手医師の教育、患者・家族へのインフォームド・コンセントに有用である。

他方問題点としては、全ての症例でいつも同じように良質なシミュレーション画像が作成できるというわけではないことである。著者らは、門脈、肝静脈、肝実質の3D画像は helical CT を用い CTAP より作成している。その場合、頭側から尾側に撮影する時、30秒の時間的位相差が生じるため、頭側と尾側で得られる画像の造影濃度に差異が認められる。そのため auto segmentation 法の芯線処理は不完全にならざるを得ず、とり込まれる3次元データも不均一で良質なシミュレーション画像が作成できなくなる。この欠点を克服し安定した画像を得るためには、今後 cone beam CT の開発が待たれる。

## 5. 結語

肝切除術シミュレーションは臨床上極めて有用で、肝臓外科手術のナビゲータとして不可欠なものになるものと思われる。

## 参考文献

- 1) 幕内雅敏 監, 幕内雅敏, 高山忠利 編: 肝臓外科の要点と盲点. 文光堂, 東京, 1988 .
- 2) 特許申請中
- 3) 佐藤耕一, ほか: リージョングローイング法による軟部組織の描出と三次元表示. Medical Imaging Techonology 12 : 379-383, 1994.
- 4) 金 武男, ほか: 肝臓の門脈解剖 経動脈性門脈造影 CT の三次元画像による解析 . 日本医学放射線学会雑誌, 59 : 765-773, 1999 .
- 5) 三浦行矣, ほか: HCC の腫瘍血流の流出経路と被膜の有無との関係. 肝胆膵, 41 : 253-260, 2000.
- 6) 三浦行矣, ほか: 特集・肝腫瘍の血流診断, 肝画像診断における3D-CT診断の有用性. 肝胆膵, 37 : 543-549, 1998.