

体表面レジストレーションの導入による 手術ナビゲーションシステム運用の改善

Improvement of a surgical navigation system

by applying anatomical point-based registration on skin surface

○ 植松美幸 (国立衛研) 坂本怜 (早大院) 許家群 (早大院)
市橋琢弥 (早大) 梅津光生 (早大) 青見茂之 (女子医大)
中村亮一 (千葉大院) 鈴木孝司 (女子医大) 村垣善浩 (女子医大)
伊関洋 (女子医大)

Miyuki UEMATSU, National Institute of Health Sciences

Rei SAKAMOTO Chia-chun HSU, Takuya ICHIHASHI, Mitsuo UMEZU, Waseda University

Shigeyuki AOMI, Tokyo Womens' Medical University

Ryoichi NAKAMURA, Chiba University

Takashi SUZUKI, Yoshihiro MURAGAKI, Hiroshi ISEKI, Tokyo Womens' Medical University

Key Words: surgical navigation system, registration, aortic aneurysm

1. はじめに

われわれは大動脈瘤手術を対象にしたナビゲーションシステムの開発をおこなってきた[1]. 初期のシステムでは局所画像のみを用いたナビゲーションを行い、医師らからも好評を得た[2]. しかし、画像空間と手術空間を一致させるためのレジストレーション作業において体内の特徴点探索にスキルを要した. 近年は開胸前に大局画像を用いたナビゲーションを行うことで、体表上から体内の骨や血管の位置関係をだまかに把握できるようにしている.

システム開発当初は画像の精度を考慮し、肋間動脈などの位置や形状の情報は局所画像を用いることを原則とした[3]. そこで、大局ナビゲーションの導入後も局所画像と大局画像の併用によるナビゲーションを行っていた[4]. 現在では画像精度の向上により、大局画像でも肋間動脈の描出が可能となり、ナビゲーションも大局画像でのナビゲーションへの一本化を図っているところである[5].

本ナビゲーションシステムのコンセプトは手術経験の少ない医師が使用しても十分設定することができ、有用な情報が呈示されることで、手術中の状況確認ができることである. ここで、有用な情報とは大動脈を人工血管に置換する際に温存すべき肋間動脈の位置と走行のことである. システムの設定については、レジストレーションに用いる特徴点探索にスキルを要した経緯を踏まえ、開胸前に体表上から選択した骨の解剖学的特徴点を用いることにした.

体表上からの特徴点選択は各点の形状や周辺組織との関係から生じる計測誤差が異なると考えられる. 本稿では、解剖学的特徴点ごとの位置決め誤差を算出するため、1) 解剖学的特徴点の位置認識のしやすさと固定のしやすさ、2) 解剖学的特徴点の誤差傾向の把握について論じる.

2. 方法

2.1 体表面レジストレーション

手術ナビゲーションシステムは手術中の患者の身体の位置をポインティングデバイスで計測したときに、患者自身の画像の中でポインティングデバイスがどの位置にどの方向にあるのか運動して示すことができる. ナビゲーションの正確さは画像空間と手術空間の位置合わせ精度に依存する.

多くの場合、レジストレーションは手術空間に置いた 3

点以上のマーカを基準としている. 手術空間に置いたマーカを画像でも同様に撮影し、一致させる剛体レジストレーションが用いられる. 大動脈手術を対象にした場合、位置合わせ用のマーカを設置し、手術中に画像を撮影することは現実的でない. また、医師のオリエンテーションスキルに依存しない方法をとるため、体表上から骨の特徴ある点をポインティングデバイスで計測することにより、マーカレスのレジストレーションを行う.

レジストレーションでは手術空間の座標系を画像空間の座標系に変換する行列 ${}^Q T_P$ を算出する. 座標系 P と座標系 Q におけるそれぞれの計測点の位置を P_i , Q_i とすると、以下の式における平均誤差 (Average Registration Error: ARE) を最小とする T が求める変換行列 ${}^Q T_P$ である.

$$ARE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - T(Q_i)|^2}$$

(N: 計測点の数, T: 4×4 の変換行列)

臨床における体表面レジストレーションの結果から、解剖学的特徴点ごとに位置決め精度に差があることや、皮下組織厚によって体表面レジストレーションの結果の信頼性が低下することがみられた. 体表面レジストレーションの結果の信頼性を向上させるために、これらの影響について考慮したい. しかし臨床における体表面レジストレーションの結果から計算する誤差は絶対誤差ではない. また臨床という条件下で体表面レジストレーションを行う対象の条件を整えることや繰り返し実験を行うことは困難である. そこで、体表面レジストレーションの評価にあたってはファントムを作成し、誤差傾向の調査を行う.

2.2 解剖学的特徴点の選択

レジストレーションに用いる解剖学的特徴点の候補は以下の7点 (左右鎖骨頭, 頸切痕, 胸骨角, 左右腸骨棘, 恥骨稜) とした. これらの点にはそれぞれの骨の位置する部位, 骨の形状や骨の上に存在する皮下組織厚の影響がある. 特徴点の位置する部位は大きく胸部 (①鎖骨頭, ②頸切痕, ③胸骨角), 腹部 a (④腸骨棘), 腹部 b (⑤恥骨稜) にわけられる. これら胸部, 腹部 a, 腹部 b から1点ずつを選択し、レジストレーションを行う.

3 実験

作製したファントムを Fig.3.1 に示す。また、各特徴点の上の皮下組織厚を Table 3.1 に示す事前準備では MDCT での撮影で得られた DICOM 画像を元に赤外線反射球の画像座標系での中心座標と、評価を行う各解剖学的特徴点の目標点の座標を登録する。また事前に解剖学的特徴点の位置把握を行うため、DICOM 画像から骨格などを抽出した 3 次元画像を作成する。

3.1 解剖学的特徴点の位置認識および固定のしやすさ

胸部の特徴点 3 点 (①鎖骨頭, ②頸切痕, ③胸骨角) について、下記 2 つに関する質問をする。シェッフエの対比較法によって 2 点の比較を行い、被験者からの回答を集計する。ここで被験者は 5 名とし、比較対象の呈示はランダムに行った。

(A) 特徴点の位置の認識

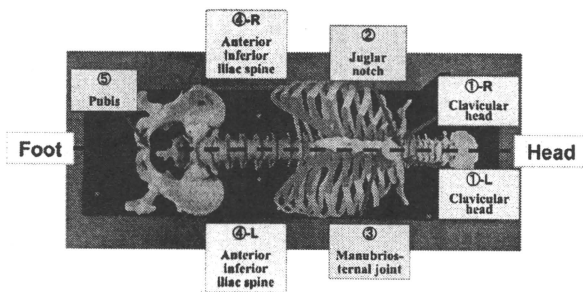
(B) 特徴点上でのポインティングデバイスの固定

3.2 解剖学的特徴点の誤差傾向の把握

実験台に固定したファントムの反射球マーカの位置を光学式位置計測装置 (Polaris®, Northern Digital Inc.) により計測し、DICOM 画像で取得された反射球マーカとの位置を校正する。

被験者に各解剖学的特徴点を呈示し、ポインティングデバイス (Fig.3.2) を用いた計測を行う。ここで、皮下組織厚モデルを変更しながら行った。被験者は非医師 12 名とした。光学式位置計測装置はファントムの右手側に配置し、計測を行う被験者はファントムの左手側に位置する。

各解剖学的特徴点をポインティングした際の座標とあらかじめ設定したレジストレーション点の座標との差を算出し、位置決め誤差とした。



①Clavicular head ②Jugular notch ③Manubriosternal joint
④Anterior inferior iliac spine ⑤Pubis
Fig3.1 Registration points

Table 3.1 Experiment condition of tissue thickness

Anatomical specific point	Thickness mm			
	No.1	No.2	No.3	No.4
①Clavicular head	0	3	6	9
②Jugular notch	0	3	6	9
③Manubriosternal joint	0	3	6	9
④Anterior inferior iliac spine	0	5	10	15
⑤Pubis	0	10	20	30

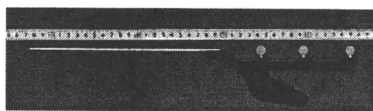


Fig3.2 Pointing device

4 結果および考察

4.1 解剖学的特徴点の位置認識および固定のしやすさ

(A) については、①鎖骨頭→②頸切痕→③胸骨角の順で位置の認識がしやすいという結果を得た。これは、比較的鎖骨頭が皮膚上からも見えやすいことから、①鎖骨頭を探し、その中間に位置する②頸切痕を特定するという流れになるためと考えられる。③胸骨角については見た目ではわかりづらく、手探りで見つけていくために位置の認識がしづらかったと考えられる。

(B) については、③胸骨角→②頸切痕→①鎖骨頭の順でポインティングデバイスの固定がしやすいという結果を得た。これは特徴点の形状に依存すると考えられる。③胸骨角がほぼ水平の形状の骨に位置するのに対し、②頸切痕は末端に位置し、さらに①鎖骨頭は曲面上に位置するためと考えられる。

4.2 解剖学的特徴点の誤差傾向の把握

胸部の解剖学的特徴点は腹部と比較し、皮下組織厚の影響が小さかった。皮下組織厚の値や変化が小さいためと考えられる。また誤差の方向に関してすべての点で皮下組織厚がある場合、頭足方向では頭方向に、背腹方向では腹方向にずれることが多かった。

①鎖骨頭

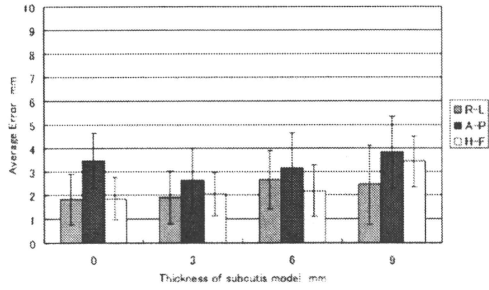
鎖骨頭の臨床と同じ配置で実験を行った結果は Fig.3.3 と Fig.3.4 で示すように左鎖骨頭の左右方向の誤差が右鎖骨頭と比較し大きいものであった。しかし臨床と左右を逆にした配置の場合、左右方向の誤差に大きな差はなく、頭足方向の誤差の違いの方が大きい結果となった。このことから鎖骨頭の誤差傾向は左右で等しくないが、位置が奥側か手前側かということのみで決まるものではないと言える。鎖骨頭付近は頭足方向の軸に対して斜めになっており、これが術者の立ち位置が変化すると術者から見て左右逆の傾斜になるため、レジストレーション点の搜索に影響することが考えられる。また鎖骨頭は球面であるため明確な位置が分かりづらい。このことから他の点と比較し目標点だと認識している点と実際の目標点の間の差が生じやすいと言える。誤差の方向に注目すると誤差の方向の傾向は左右方向について左右の鎖骨頭の間で関係性が見られなかった。

これらのことから鎖骨頭は誤差要因が多く、またそれぞれの誤差要因を分解して扱うことが難しい。また鎖骨頭は体の中心線付近にあるため左右方向の精度を確保するのに向かず、頭足方向には近い位置により誤差の小さい胸骨角があるため、レジストレーション点としての有用性は低いと言える。

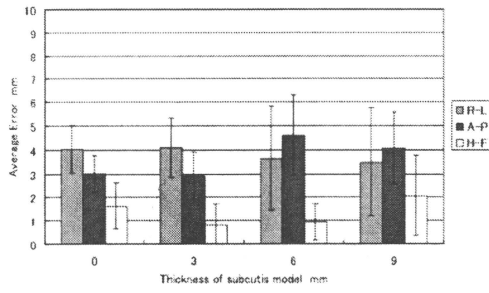
②頸切痕

頸切痕の誤差は Fig.3.5 のように背腹方向の誤差が非常に大きくなった。これは頸切痕の位置が胸骨の上端であるので、骨の形状の背腹方向の変化が大きいためであると考えられる。また左右方向に注目すると皮下組織厚との関係は見られず、2mm 以内の誤差となっている。この結果は他の解剖学的特徴点と比較し小さい値である。これは頸切痕が体の中心線上にあることや、頸切痕の形状が体の正面から見て V 字型になっていることが要因であると考えられる。誤差方向に注目すると頭足方向と背腹方向について誤差の方向は皮下組織との関係は見られず、常にほぼ一定の割合であった。

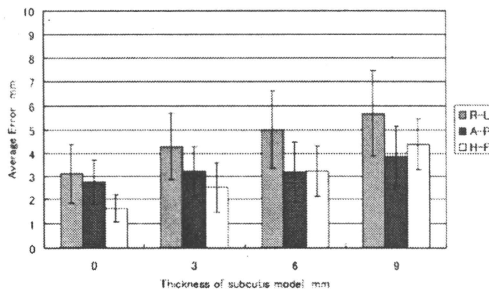
これらのことから、頸切痕をレジストレーション点として使用する際は背腹方向の信頼性が低い傾向、左右方向の信頼性が高い傾向があると言える。このため頸切痕は背腹



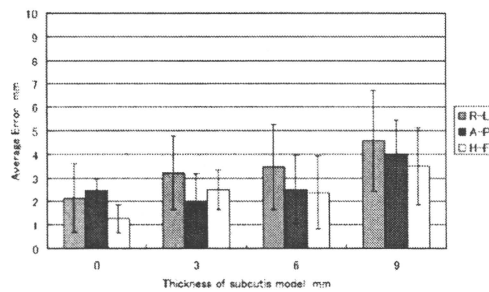
Stand position: clinical use (left side of the phantom)



Stand position: opposite (right side of the phantom)
Fig.3.3 Average Error (right clavicular head)



Stand position: clinical use (left side of the phantom)



Stand position: opposite (right side of the phantom)
Fig.3.4 Average Error (left clavicular head)

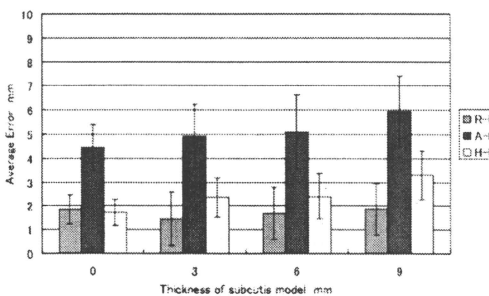


Fig.3.5 Average Error (jugular notch)

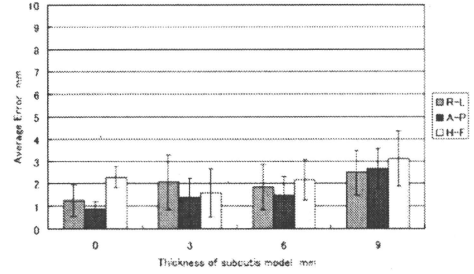
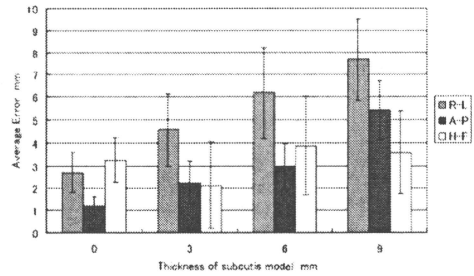
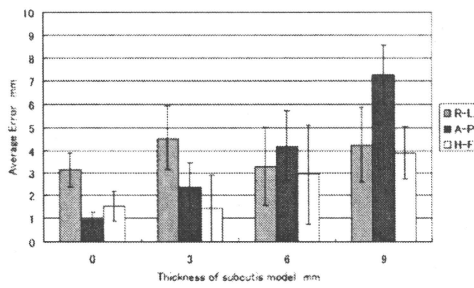


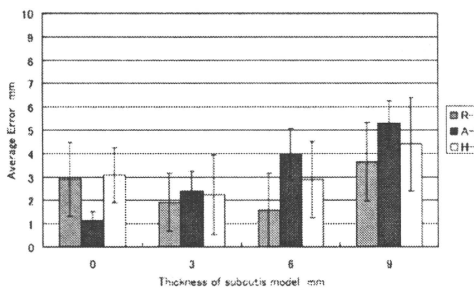
Fig.3.6 Average Error (manubriosternal joint)



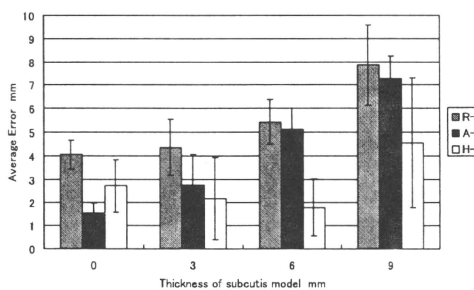
Stand position: clinical use (left side of the phantom)



Stand position: opposite (right side of the phantom)
Fig.3.7 Average Error (right anterior inferior iliac spine)



Stand position: clinical use (left side of the phantom)



Stand position: opposite (right side of the phantom)
Fig.3.8 Average Error (left anterior inferior iliac spine)

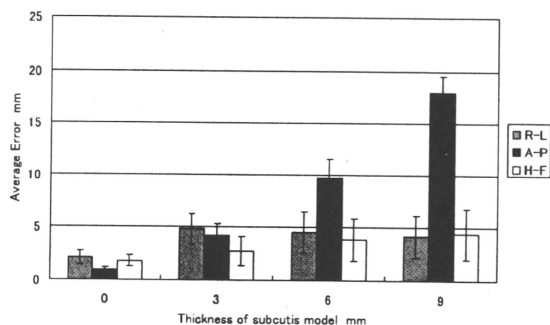


Fig. 3.9 Average Error (pubis)

方向の精度が必要な際は使用しないか、背腹方向の値は使用せず左右方向と頭足方向のみを使用することで精度向上を図れる可能性がある。

③胸骨角

胸骨角の誤差はFig.3.6のように各軸の間に有意な差がみられなかった。全体的な誤差は他の解剖学的特徴点と比べ小さいものであった。これは胸骨角が胸骨という平面状の突起であり、他の解剖学的特徴点のような立体的な形状をしていないため認識やポインティングツールで指すことが、比較的容易であると考えられる。また体の中心線上に位置していることや、胸骨上であるため皮下組織厚が小さいことも誤差が小さい要因としてあげられる。誤差方向に注目すると、左右方向の誤差方向の傾向と背腹方向の誤差方向の傾向が非常に似た曲線になった。

これらのことから胸骨角はレジストレーション点として他の解剖学的特徴点と比較し、信頼性が高いと言える。

④腸骨棘

腸骨棘の臨床と同じ配置で実験を行った際の結果はFig.3.7とFig.3.8で示すように皮下組織厚が大きくなるにつれ、右の腸骨棘の左右方向の誤差が左の腸骨棘の左右方向の誤差と比較し大きくなった。その一方で臨床と左右を逆にした配置で実験を行った際の結果はFig.3.7とFig.3.8で示すように皮下組織厚が大きくなるにつれ左の腸骨棘の誤差の方が大きくなった。このことから腸骨棘における左右方向の誤差についてはレジストレーションを行う術者から遠い点にある方の誤差が大きくなるといえる。これは腸骨棘に対する角度が手前側のものと奥側のもので異なるため、ポインティングツールで指す際の角度や、腸骨棘を探索する際に周辺を手で触る時に手前側では押すように触るのに対し奥側では引くように触ることになることや、手前側の腸骨棘を探索際には視線と左右軸が直角になるのに対し、奥側の腸骨棘を探索際には視線と左右軸の角度が小さくなることなどが要因として考えられる。このことから腸骨棘をレジストレーション点として使用するには術者に近い位置を使用する方が左右方向の誤差を低減できると考えられる。誤差の方向に注目すると、左右の腸骨棘の間で似た傾向を持つのが背腹方向であり、この軸に関してはともに皮下組織厚が増すにつれ誤差方向が腹方向であることが多くなった。しかし左右方向と頭足方向については関係が見られなかった。

背腹方向と頭足方向の誤差については左右での差が見られなかった。背腹方向の誤差は左右どちらの腸骨棘についても皮下組織厚に比例する関係がみられた。またその比例係数は小さな差であるが配置によらず奥側の方が大きかった。背腹方向の誤差については皮下組織厚を考慮し、レジストレーション点を設定することで誤差の低減を図れるこ

とが示唆された。

⑤恥骨稜

恥骨稜の誤差はFig.3.9のように皮下組織厚が大きくなるにしたがって、背腹方向の誤差が他の軸と比較し顕著に大きくなった。これは恥骨周辺の皮下組織厚が他の解剖学的特徴点周辺よりも大きいことが要因と考えられる。また皮下組織厚と背腹方向の誤差は比例関係にあることが分かる。このため恥骨稜をレジストレーション点として使用する際には、皮下組織厚の影響を考慮し骨上から皮膚側にレジストレーション点を移動させて設定することで誤差を低減できることが示唆された。

他の軸に関しては皮下組織厚と誤差の大きさの間に関係が見られなかった。このため皮下組織厚に関わらず頭足および左右方向については一定の信頼性を保つと言える。

誤差方向に関しては背腹方向に関して皮下組織厚を設けた場合、誤差方向はほとんど腹方向になった。これは恥骨稜付近の皮下組織厚が非常に大きく、体表面が背腹方向の軸に垂直に近いからであると考えられる。

5 まとめ

レジストレーション評価用ファントムを用いて、体表から選択した各解剖学的特徴点の誤差の値と傾向の調査を行った。その結果、以下のように結論づけられる。

- (i) 開胸位置の決定や、対象血管の同定に重要な頭足方向の誤差はいずれの点においても平均誤差 5mm 以下であった。
- (ii) 解剖学的特徴点ごとに誤差の値や傾向、皮下組織厚の影響のしかたが異なった。
- (iii) 左右対称の解剖学的特徴点においても誤差の傾向は左右対称にならなかった。

参考文献

- (1) 植松美幸, 鈴川浩一, 上杉繁, 安藤隼人, 森田篤, 青見茂之, 西井規子, 飯村浩, 中村亮一, 伊関洋, 梅津光生, 胸腹部大動脈置換術のためのナビゲーションシステムの開発, 日本コンピュータ外科学会誌, vol.7, no.3, pp.469-pp.470, 2005
- (2) 青見茂之, 植松美幸, 伊関洋, 齊藤聡, 富岡秀行, 西井規子, 飯村浩, 中村亮一, 村垣善浩, 鈴川浩一, 安藤隼人, 原美紀子, 黒澤博身, 梅津光生, 胸腹部大動脈置換術用の新しいナビゲーションシステムの開発と臨床応用, 適応医学, vol.10, no.2, pp.9-pp.13, 2006
- (3) 植松美幸, 青見茂之, 鈴川浩一, 西井規子, 中村亮一, 村垣善浩, 伊関洋, 上杉繁, 梅津光生, 胸腹部大動脈置換術用ナビゲーションシステムの臨床応用, 日本コンピュータ外科学会誌, vol.8, no.4, pp.417-pp.424, 2007
- (4) 植松美幸, 中野喜隆, 松川紘大, 宇都宮隆平, 中村亮一, 村垣善浩, 伊関洋, 青見茂之, 梅津光生: 大血管手術の安全性を高める画像支援ナビゲーションシステム, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.14, no.1 pp.39-pp.48, 2009
- (5) 植松美幸, 体内構造を透かし見て目標血管を特定する～大血管ナビゲーションシステム～, 未来医学, vol.24, pp.76-pp.79, 2009

An anatomical landmark point-based registration using tissue thickness correction based on Bayesian estimation

M. UEMATSU^{*1}, Y. Nakano^{*2}, C. Hsu^{*2}, R. Sakamoto^{*3}, M. Umezu^{*2,3}, S. Aomi^{*4},
R. Nakamura^{*5}, T. Suzuki^{*6}, Y. Muragaki^{*6}, H. Iseki^{*6}

^{*1}Division of Medical Devices, National Institute for Health Sciences, ^{*2}Major in Integrated Bioscience and Biomedical Engineering, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Waseda University,

^{*3}Department of Mechanical Engineering, School of Science and Engineering, Waseda University,

^{*4}Department of Cardiovascular Surgery, Tokyo Women's Medical University,

^{*5}Department of Medical System Engineering, Graduate School of Engineering, Chiba University,

^{*6}Faculty of Advanced Techno-Surgery, Institute of Advanced Biomedical Engineering and Science, Graduate School of Medicine, Tokyo Women's Medical University

Keywords: Point-based registration, Error-correction algorithm, Bayesian estimation

1. はじめに

大動脈手術用ナビゲーションシステムは開発当初、開胸後に体内の特徴点を計測し、剛体レジストレーションしていた。手術に役立つナビゲーションが行えたが、体内の特徴点探索に手術者のスキルを要した。開胸後、体内の解剖学的構造の位置関係を的確に理解するためには、開胸前に肋骨の位置・走行を把握することが先決であると考え、現在、大局ナビゲーションを導入している。

今回、体表からでも特徴を捉えやすい骨上の点の特性を考慮し、皮下組織厚に応じて点の位置を補正する体表レジストレーションを開発し、臨床例で評価したので報告する。

2. 方法

【体表からの特徴点計測】レジストレーション点には骨の凹凸部など特徴のある部位（胸骨角、恥骨稜など）の点を用いる。体表面から触れながら探索し、ポインタで指し示して光学式位置計測器で計測した点を画像上の同一点と対応付ける。

【皮下組織厚に応じた重み付け】ある骨上の点の計測値 (m) を Fig.1 のように仮定した。ここで、横軸は皮下組織厚、縦軸は計測値である。骨上の点は皮下組織の厚さが大きくなるにつれて、ポインタで正確に計測するのが難しくなる。この誤差は E_k で示され、皮下組織厚 (T_k) によるずれと点をポインタ計測による指し示し誤差を含む。

【皮下組織厚の誤差への影響の推定】皮下組織厚に起因する誤差の影響をアルゴリズムに反映させるため、ベイズの定理を用いる (式 (1))。原因 E_i の事前確率が $P(E_i)$ のときに、あるデータ F が得られたとする。原因 E_i の事後確率が $P(E_i|F)$ 、原因 E_i に対する結果の確率が $P(F|E_i)$ として、事後確率を求める。今回は皮膚厚を考慮したファントム実験の結果をこの式にあてはめることで、誤差の影響を推定する。

$$P(E_i|F) = \frac{P(E_i) \cdot P(F|E_i)}{\sum_{j=1}^n P(E_j) \cdot P(F|E_j)} \quad (1)$$

【皮下組織厚を補正したレジストレーション】

上記より求めた各々のレジストレーション点の誤差分布より、方向別（頭足、左右、背腹）に重み付けを行う。計測点と設定点との最小2乗誤差を方向別に算出し、和が最も小さくなるようにレジストレーションする。

3. 臨床例による評価

従来のレジストレーション法では誤差が大きく、改善が求められた症例に対して、本手法を適用した。特徴点は頸切痕、左・右前腸骨棘、恥骨稜の4点で、皮下組織厚はそれぞれ 15.4mm、

36.4mm、92.5mm であった。肋間動脈に近い骨上の点の位置誤差を算出し、評価に用いた。

4. 結果・考察

結果を Fig.3 に示す。補正により、絶対値で 26.4%の改善が見られた。頭足方向については目標精度 5mm 以下を満たしたが、背腹方向の誤差は大きかった。本手法を用いた際の皮下組織厚に厚みがある場合の補正限界やナビゲーション施行としての妥当性などについては、今後さらに調査していくことが求められる。

5. おわりに

体表レジストレーションの精度向上のため、皮下組織厚を補正するレジストレーションを提案し、臨床例で評価した。体表の点を利用して体内構造が十分な精度で合わせられれば、より使いやすいナビゲーションシステムになるであろう。

謝辞

本研究は科研費(20700414)の助成を受けたものである。

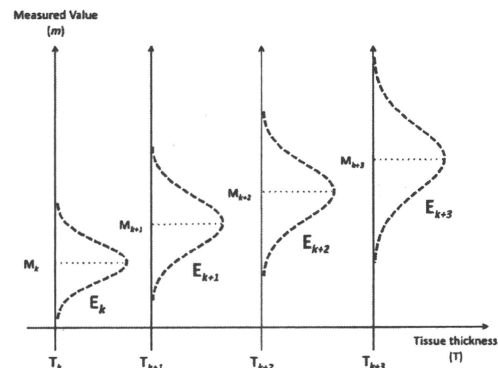


Fig.1 Distribution of measured data corresponding to tissue thickness

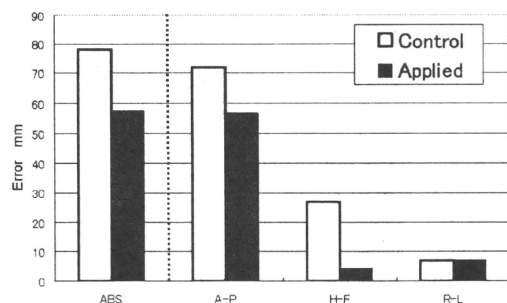


Fig.2 Absolute error and its directional components between control and compensated ones using a new algorithm (Thickness of tissues - large)

Error measurements for tissue thickness

on an anatomical landmark point-based registration

R. Sakamoto^{*1}, M. Uematsu^{*2}, Y. Nakano^{*3}, C. Hsu^{*3}, M. Umezu^{*1,5}, H. Iimura^{*4}, S. Aomi^{*5},
R. Nakamura^{*6}, T. Suzuki^{*7}, Y. Muragaki^{*7}, H. Iseki^{*7},

^{*1}Department of Mechanical Engineering, School of Science and Engineering, Waseda University,

^{*2}Division of Medical Devices, National Institute of Health Sciences, Tokyo, Japan,

^{*3}Major in Integrated Bioscience and Biomedical Engineering, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Waseda University,

^{*4}Department of Radiological Service, Tokyo Women's Medical University,

^{*5}Department of Cardiovascular Surgery, Tokyo Women's Medical University,

^{*6}Department of Medical System Engineering, Graduate School of Engineering, Chiba University,

^{*7}Faculty of Advanced Techno-Surgery, Institute of Advanced Biomedical Engineering and Science, Graduate School of Medicine, Tokyo Women's Medical University,

Keywords: Thoracoabdominal aortic aneurysm, Surgical navigation system, Phantom experiment

1. はじめに

胸腹部大動脈瘤の人工血管置換術に特化した手術ナビゲーションシステムを2006年度より49例の臨床に応用してきた。当初は開胸後に重要な肋間動脈の位置と走行を確認する局所ナビゲーションのみ行っていたが、2008年度より、開胸前に肋骨位置を確認する大局ナビゲーションも導入している。大局ナビゲーションは解剖学的特徴点計測による体表レジストレーションによるが、現状は血管の弁別に必要な頭足方向5mm以内の精度を実現していない。本稿では体表レジストレーションの誤差要因を明らかにするため、レジストレーション点として使用する各解剖学的特徴点の計測由来誤差を調査したので報告する。

2. 方法

特徴点として用いる骨と皮膚の間には皮下組織が存在する。体表レジストレーションの誤差は皮下組織厚の影響を大きく受けると考えられる。そこで、ヒトの骨格と皮下組織を模擬したレジストレーション用ファントムを作製し、影響を調査した。被験者がポインティングツールで指した解剖学的特徴点を、光学式三次元位置計測器を用いて位置計測し、方向別（頭足、左右、背腹）に位置ずれを求め、平均と分散を算出した。実験条件は以下とした。解剖学的特徴点は以下の7点（左右鎖骨頭、頸切痕、胸骨角、左右腸骨棘、恥骨稜）とした。皮下組織モデルは患者平均値を基準に3種類の厚さで作製し、特徴点上に設置した。ここで、患者平均厚は胸部（鎖骨頭、頸切痕、胸骨角）で6.6mm、腹部a（腸骨棘）で11.8mm、腹部b（恥骨稜）で29.7mmを用いた。被験者は12名、試行回数は各5回とし、調査を行った。

3. 結果・考察

皮下組織厚の影響を方向別にみたところ、最も位置ずれが大きかったのは背腹方向であった。背腹方向に着目した結果を Fig.1 に示す。縦軸は目

標点に対する計測値の位置ずれであり、腹側を正方向としている。横軸はモデルの厚みを患者の平均皮下組織厚で割り無次元化した値である。横軸の1という値はモデルの厚さとヒトの皮下組織の平均的厚さが一致することを示す。計測した点のうち3点を示した。Aは胸骨角、Bは左腸骨棘、Cは恥骨稜である。胸部は皮下組織厚が薄いため、鎖骨頭、頸切痕では傾向がみられなかった。A-Cでは皮下組織厚に対して計測誤差の平均値が線形の関係にあり、分散値は広がることが読み取れる。皮下組織の厚みに応じた平均量を補正し、分散を積み付けに利用することでレジストレーションの精度向上が期待される。

4. おわりに

体表レジストレーションの精度向上のため、各解剖学的特徴点の計測由来誤差を調査した。これより、各軸別に5mm以内の精度を実現するための補正係数が得られた。今後はこれを元に新たな体表レジストレーションに応用する予定である。

謝辞

本研究は科研費(20700414)の助成を受けたものである。

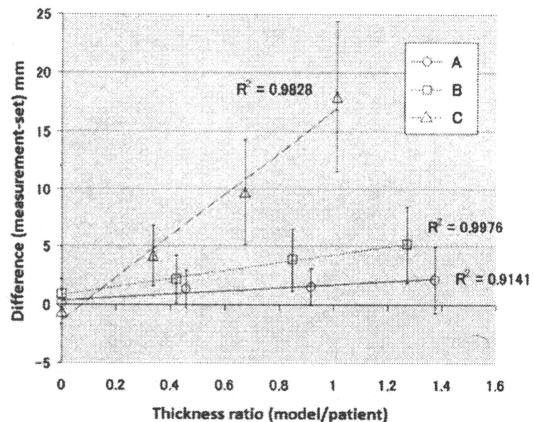


Fig.1 Difference in position at the target point

An automatic image segmentation method assisting for endovascular stent-grafting

C. Hsu¹, M. UEMATSU^{*2}, Y. Nakano^{*1}, R. Sakamoto^{*3}, M. Umezu^{*1,3}, T. AZUMA^{*4}, S. Aomi^{*4},
R. Nakamura^{*5}, T. Suzuki^{*6}, Y. Muragaki^{*6}, H. Iseki^{*6}

¹Major in Integrated Bioscience and Biomedical Engineering, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, ²Division of Medical Devices, National Institute of Health Sciences,

³Department of Mechanical Engineering, School of Science and Engineering, Waseda University,

⁴Department of Cardiovascular Surgery, Tokyo Women's Medical University,

⁵Department of Medical System Engineering, Graduate School of Engineering, Chiba University,

⁶Faculty of Advanced Techno-Surgery, Institute of Advanced Biomedical Engineering and Science, Graduate School of Medicine, Tokyo Women's Medical University

Keywords: Thoracoabdominal Aortic Aneurysm, Stent-grafting, Auto segmentation, Region growing

1. はじめに

大動脈瘤用ステントグラフト(以下SG)は2006年に腹部用のSGが初めて日本国内で薬事認可されて以来、症例は増加しており、この数年間で5,000件以上ある。将来的にはさらに増加が予測され、より安全で安心な治療が期待される。本研究はSG挿入術に適した画像支援システムの開発を目的とし、特にC-armの画像から大動脈の部位を自動セグメンテーションするアルゴリズムを構築したので報告する。

2. ステントグラフト用画像支援システム

血管の位置・形状は造影剤の流入時しかわからない。そこで、大動脈の形状を撮影中のX線画像と同時に確認するため、モニタ上にフィルムを貼り、医師が手描きで輪郭を抽出した結果を用いているのが現状である。本研究はこの作業を簡易化するのを目的とする。

今回提案するシステムをFig.1に示す。C-armの映像出力をPCにつなぎ、キャプチャーボードを用いてX線画像を取り込む。画像に自動血管抽出アルゴリズムを適用し、血管の輪郭を描画する。結果はX線画像の上に輪郭線を重畳することにより示される。

3. 自動血管抽出アルゴリズム

C-armの画像から造影剤で強調された大動脈部位の輪郭線を自動抽出するアルゴリズムについて説明する。

A. 差分画像による血管領域の可視化

造影された血管領域 L を次の方法で抽出する。

造影前の基準画像 I_0 に対し、造影剤を流す際の画像 I_t の差分を取り、平均を算出する(式(1))。

$$L = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T (I_t - I_0) \quad (1)$$

B. Region Growing によるセグメンテーション

過程 A で抽出された血管領域 L に対し、Region Growing をベースにした新たなセグメンテーションアルゴリズムを適用する。このアルゴリズムは式(2)で示される。 Z_k は注目画素(Seed)に隣接している生成領域外縁の画素値とし、Sobel フィルターにより微分した画素値を ∇Z_k とする。

$$\left| \sum_{k=1}^n \alpha_k (Z_k + \nabla Z_k) - Z_{Seed} \right| < T \quad (2)$$

ノイズの影響を抑えるため、この和を Gaussian 分布 (α_k) により重みをかけ、平滑化する。上記の手法を大動脈造影時の映像 1 例に適応した。

4. 結果・考察

過程 B は過程 A の結果により判別され (Fig.2), 輪郭を X 線画像と重畳表示した結果を Fig.3 に示す。血管の輪郭は正確に抽出された。

5. おわりに

C-arm の画像から大動脈の部位を自動セグメンテーションするアルゴリズムを構築し、臨床例に適用したところ、良好な結果が得られた。現在初期注目画素は手動で決めているが、今後は画像の変化に応じて自動化する予定である。

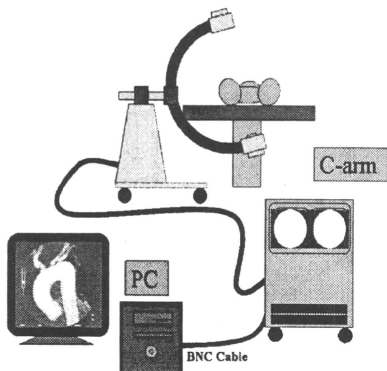


Fig1. System overview

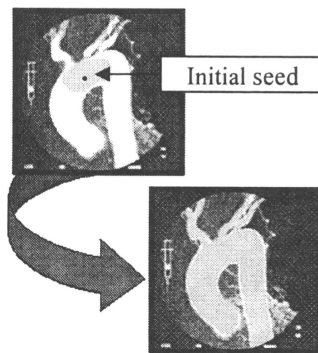


Fig2. Region growing process

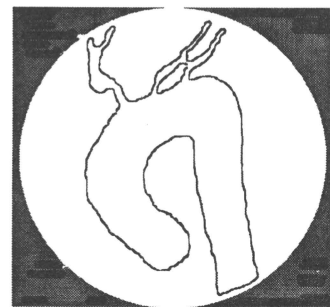


Fig3. Contour extraction of Aorta

大動脈外科と脊髄保護 —コンセプトの変化と麻酔科の役割—

椎谷紀彦*

〔要旨〕大動脈外科に伴う脊髄虚血は、分節動脈由来栄養動脈の非再建により発生すると考えられてきたが、最近では、豊富な側副血行路の存在により、脊髄灌流圧(動脈圧—脳脊髄圧)を高く維持すれば分節動脈をすべて犠牲にしても脊髄虚血には陥らない、というコンセプトが主流となっている。本コンセプトにおいては、モニタリング結果に応じた血压管理やCSFDなど、脊髄灌流圧維持のために麻酔科が果たす役割は非常に大きい。本稿では、現代のコンセプトに基づく脊髄保護戦略を概説し、その戦略下で外科医が麻酔科医に期待するものを述べるとともに、どのような症例で側副血行路が不十分になるのかに関する最近の知見と自験例の手術成績を紹介する。

キーワード：胸腹部大動脈瘤、脊髄障害、脊髄栄養動脈、側副血行路

(日臨麻会誌Vol.30 No.4, 497～505, 2010)

はじめに

大動脈外科における脊髄障害は、生活の質のみならず生命予後をも左右する重篤な合併症である。その発症率は胸腹部大動脈置換術で最も高く、landmarkとなるCrawfordの1986年の報告では、Crawford I型10%、II型28%、III型3%、IV型2%とされている¹⁾。障害の原因は手術に伴う虚血再灌流障害であるが、現在に至るまで、これを確実に防止する方法は確立していない。

近年の補助手段や画像診断の進歩と、脊髄障害発症機転のよりよい理解に伴い、脊髄保護のコンセプトは大きく変化してきている。新しいコンセプトに基づく脊髄保護戦略においては、麻酔科が果たす役

割は非常に大きいものとなっており、この領域の手術成績改善に大きく貢献している。本稿では、近年の脊髄保護のコンセプトの変化と、これに基づく脊髄保護戦略を概説し、外科医が麻酔科医に期待するものを述べるとともに、自験例の手術成績の現況を紹介する。

I 脊髄保護のコンセプトの変化

大動脈外科に伴う虚血性脊髄障害の原因は、分節動脈由来栄養動脈の非再建や塞栓、血行再建中の脊髄虚血、再建動脈閉塞や呼吸血行動態悪化により発生する術後の虚血等、多様である²⁾。このうち最も重要視されてきたのは分節動脈由来栄養動脈の非再建であり、これを同定し再建することが長く王道で

*浜松医科大学外科学第一講座

著者連絡先 椎谷紀彦
〒431-3192 静岡県浜松市東区半田山1-20-1
浜松医科大学外科学第一講座

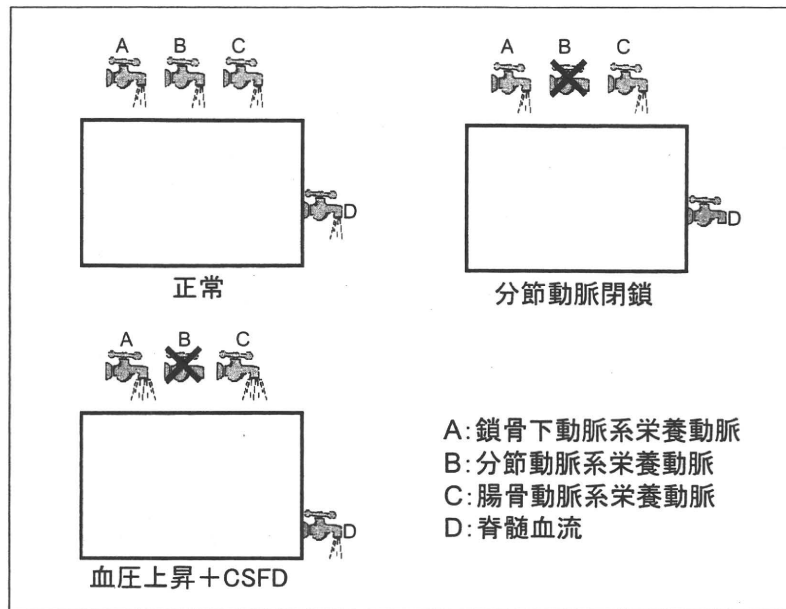


図1 Collateral network conceptの模式図

分節動脈閉鎖により水位が下がり脊髄血流が低下するが、血圧上昇により鎖骨下動脈系・腸骨動脈系からの血流が増加し水位が多少改善する。これにCSFD(脳脊髄液ドレナージ)を加えることにより、多少低い水位でも脊髄血流が確保される(図では脊髄血流蛇口の位置が下がっている)。

あった。しかし脊髄保護のコンセプトは近年変化しており、脊柱管内外には豊富な側副血行路が存在するため、脊髄灌流圧(動脈圧-脳脊髄圧)を高く維持すれば分節動脈をすべて犠牲にしても脊髄虚血には陥らない、という collateral network concept³⁾が普及してきている(図1)。

このコンセプト普及の契機となったのは、1996年のGriepplらの著名な論文⁴⁾である。彼らは、somatosensory evoked potential(SSEP)モニター下に全分節動脈を順次 clipping しても脊髄虚血変化は1例も検出されず、術後の脊髄障害も2%にすぎなかったと報告し、脊髄血行は1本の栄養動脈に依存するものではないことを示した。ただし10対以上の分節動脈を clipping した場合(Crawford II型にほぼ相当)脊髄障害は9.5%に発生しており、成績は決して良好とはいえなかった。一方、当時すでにAcherらは、分節動脈を再建せずに脳脊髄液ドレナージ(cerebrospinal fluid drainage: CSFD)とナロキソ

ンを用いて脊髄障害2%、Crawford II型でも5%という良好な成績を報告している⁵⁾。さらに、ステントグラフト(thoracic endovascular aneurysm repair: TEVAR)では脊髄障害は低率であると一般に信じられているが、TEVARで分節動脈再建が行われることはない。もちろん、TEVARでは外科手術よりも治療範囲が狭い、下行大動脈遠位部への留置が少ない、といった selection bias は存在するが、“脊髄血行は1本の栄養動脈に依存するものではない”というメッセージは、裏付けられるものである。

Collateral network concept が広く受け入れられるようになったのは、2006年にGriepplらが、平均8対の分節動脈を閉鎖した100例で脊髄障害2%という良好な成績を報告⁶⁾して以降である。これが1996年の報告と異なる点は、側副血行を維持するために systematic に高めの血圧を維持しCSFDを行ったことである。この結果を受けてGriepplは2007年、脊髄には分節動脈、鎖骨下動脈、内腸骨動脈など多数

のinputがあり、脊柱管内外には豊富な側副血行路が存在するため、脊髄虚血障害を防止するために最も重要なことは脊髄灌流圧を高めに維持し側副血流を期待することである、という collateral network concept を提唱した³⁾。

実はこのような collateral network の存在は、1974年の Dommissie らの cadaver study⁷⁾ですでに明らかにされていたことである。著者も1997年の review²⁾で、側副血流を生かすことにより再建中の脊髄虚血を防止することが可能であることを述べている。

では従来の報告では、なぜ脊髄障害が高率だったのだろうか？ これは再建中、特に分節動脈再建中の虚血が、脊髄障害の主たる原因であるためと考えられ、著者は脊髄障害6例の evoked spinal cord potential (ESCP) 変化から、これを示している⁸⁾。また TEVAR では、再建中の虚血がないのが、脊髄虚血が低率である最大の要因と思われる。

II Collateral network concept 時代の脊髄保護戦略

1. 遠位側大動脈灌流 (distal aortic perfusion : DAP)

脊髄保護目的に超低体温を系統的に用いるものもあるが、開胸下超低体温法の合併症を嫌い、一般には軽度低体温心拍動下で手術が行われることが多い。この場合、脊髄虚血時間を短縮するため、古くから DAP が行われてきた。

DAP は分節の大動脈遮断との組み合わせで中枢側大動脈吻合中の脊髄虚血を回避可能であるものの、分節動脈再建中の脊髄側副血流維持の点では不十分となりうる。その要因はいくつか考えられる。1つは、分節動脈逆流による脊髄血流 steal で、これを止めることの重要性は1980年代から広く認識されていた^{9), 10)}。2つめは、DAP は定常流の低圧灌流であり、側副血流の供給源としては不十分と思われることである。このため collateral network concept では脊髄灌流圧上昇を目的とし、大動脈圧を

高めに維持するとともに CSFD が行われている。

2. CSFD

脊髄保護目的の CSFD の歴史は古く、1960年には Miyamoto ら¹¹⁾、1962年には Blaisdell ら¹²⁾が報告している。原理は CSF 圧を下げ脊髄灌流圧を上昇させることであるが、1991年の Crawford らの prospective randomized study で無効と報告された¹³⁾ため、広く普及するには至らなかった。しかしこの研究では、IRB (治験審査委員会) によりドレナージ量が 50mL に制限され CSF 圧が十分下げられなかったことが無効の要因であるとの批判があり、その後も Hollier ら¹⁴⁾や Acher ら⁵⁾は CSFD を用いて良好な手術成績を報告していた。CSFD が広く用いられるようになったのは、Coselli らが2002年、圧規定で CSFD を行う prospective randomized study を行い、その有効性を確認¹⁵⁾して以降である。時を前後して、遅発性脊髄障害が CSFD により回復した報告が相次ぎ^{16), 17)}、現在は collateral network concept の essential component と考えられている。

CSFD の合併症としては、髄液瘻、穿刺部血腫、髄膜炎、チューブ断裂、頭蓋内硬膜下血腫等が報告されている^{18), 19)}。このため、血腫の対策として手術前日に留置を行うものもあり、また断裂しやすいシリコン製チューブを嫌うものもある。最も重篤な合併症である頭蓋内硬膜下血腫に関しては、Dardik らは大量ドレナージが risk factor であるとし、CSF 圧 > 10cmH₂O を推奨している²⁰⁾。これに対し Estrera らは、量より速度が問題であるとし、< 15mL/hr を推奨している¹⁸⁾。著者は1996年8月から CSFD を導入しているが、13cmH₂O の圧規定とすることで、合併症の経験はない。

3. 脊髄血行動態の把握

DAP が脊髄側副血流維持には不十分となりうる3つめの理由は、脊髄栄養動脈の解剖に求めることができる。すなわち、分節動脈由来の前根動脈と前脊髄動脈の合流形態は、前根動脈がヘアピンカーブを描いて尾側前脊髄動脈に移行するものと、トの字型

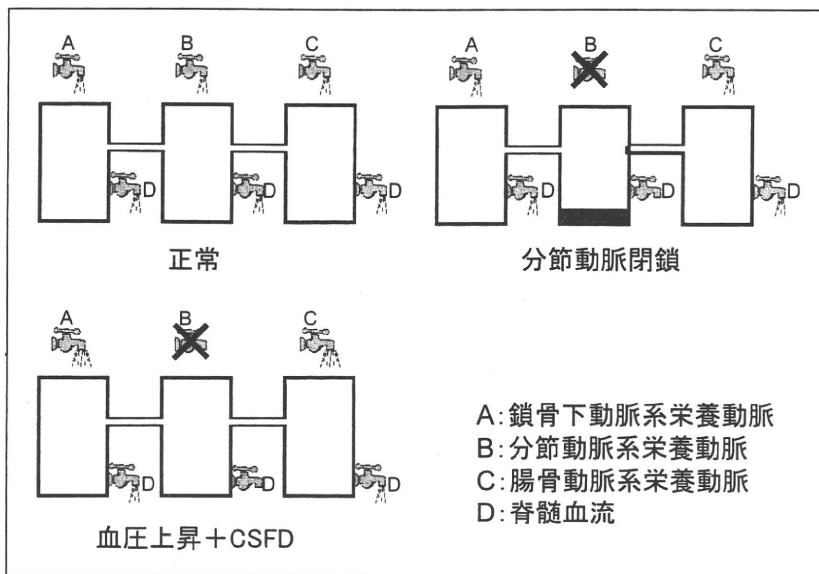


図2 前脊髄動脈の不連続性を加味した脊髄血流の模式図
 前脊髄動脈は血行力学的には不連続な場合が多く、実際には血圧上昇とCSFD(脳脊髄液ドレナージ)を加えても、胸髄への血流供給は不十分となりうる。この模式図では、前脊髄動脈の血行力学的連続性を、3つの水槽を連結する管の高さで表現しうる。

に合流するものに2大別できるが、前者では合流部の尾側から頭側の脊髄への血流は期待できないことを、すでに1986年にSvenssonらが指摘している²¹⁾。著者はMD-CTにてこの形態を把握し、術中脊髄虚血の機序を電気生理学的モニタリング結果から検討した²²⁾。この検討では、ヘアピン型動脈が単独で描出されたものでは半数が再建再灌流まで虚血はreverseできなかった一方で、トの字型や複数の栄養動脈が描出されたものでは分節動脈の逆流制御で虚血はすべてreverseできた。すなわち、トの字型の合流形態を有する場合、前脊髄動脈は血行動態的に頸髄から腰髄まで連続とみなすことができ、これを介する側副血流は、その供給源が鎖骨下動脈や内腸骨動脈であっても、有効に胸髄まで分布すると思われる。一方、ヘアピン型栄養動脈が単独で描出されたものは前脊髄動脈を介する側副血流は期待できず、脊髄血流が不十分となる場合が半数程度ある。こういった症例では図1に示したようなコンセプトは成立せず、図2のようなモデルを考える必要が

ある。

4. 小範囲分節遮断法

側副血行路には、前脊髄動脈を介するもののほかに、分節動脈間の吻合を介するものと脊柱管内外の細動脈を介するものがある。前者は近接する動脈からのものであれば低圧・定常流でも有効、後者は良好な拍動流が維持されている場合にかぎり有効と考えられる。

著者は、近接する分節動脈間の吻合を介する側副血流を最大限に生かしつつ血行再建を行うため、小範囲分節遮断法を提唱してきた⁸⁾。これは、一度に遮断する分節動脈が2対以下の場合脊髄障害が発生しないという自験例の分析結果に基づくもので、2分節以下の小範囲遮断・分節動脈再建を繰り返すものである。この方法の妥当性を検証するため、小範囲分節遮断法導入前後で再建中の虚血発生頻度(ESCPを用いた)が減少したかどうかを検討したところ、小範囲遮断以前は85%に脊髄虚血が検出されたのに対し、導入後は46%に減少していた。対象を

広汎な Crawford I・II型に絞って再度検討したが、小範囲分節遮断：導入により脊髄虚血発生頻度は90%から27%に減少していた²³⁾。

5. 遅発性脊髄障害と分節動脈再建

分節動脈非再建時の脊髄障害の特徴は、遅発性障害が多いことである。Griepの最新の報告では遅発性障害が85%を占め²⁴⁾、TEVAR後の脊髄障害も遅発性障害がほとんどとされる。これは、側副血行路に依存した脊髄血流量がborderline rangeにあるため、術後の呼吸血行動態の悪化に弱いことが原因の一つと考えられている。ブタの分節動脈閉塞モデルでは、脊髄障害ブタでも術後の脊髄血流は減少していないが、非障害ブタにみられる72時間程度続くhyperemic responseがみられない²⁵⁾。このような観点から、遅発性脊髄障害の対策として、術後も高血圧管理とCSFDを72時間継続することが行われている。

一方、分節動脈再建を行った自験例では、遅発性障害例は経験していない。これは、再建により脊髄血流がより高いレベルに維持されたためと考えられる。Collateral network conceptは、分節動脈再建は不要であるという解釈をされることが多いが、側副血流を上手に生かせば虚血を作らずに分節動脈再建が可能という解釈も可能である。著者はこの立場に立ち、分節動脈再建は遅発性障害防止に有効と考え、側副血流を最大限に生かす小範囲分節遮断法を用いて分節動脈再建を行っている。

6. 脊髄栄養動脈の同定

古くは選択的血管造影が行われたが、それ自体に脊髄障害のリスクがあり普及しなかった。1980年代後半から、術中の電気生理学的モニタリングにより同定しようという試みがなされ、Laschingerらはsomatosensory evoked potential(SSEP)を用い²⁶⁾、われわれは硬膜外刺激、硬膜外導出によるevoked spinal cord potential(ESCP)を用いてきた²⁷⁾。しかし2000年代に入り、MRA²⁸⁾やMD-CT²⁹⁾を用いて術前に非侵襲的同定が可能となり、脊髄保護戦略も

大きく変化した。著者はMD-CTを用いてきたが、再建する分節動脈とその手順は術前決定するよう戦略が変化し、再建数も栄養動脈とその前後あわせて2分節程度に減少した。

この戦略の妥当性を2007年、小範囲分節遮断法導入後の胸腹部大動脈置換自験例111例を対象として検討した。MD-CT非施行56例と施行55例の比較では、遮断分節数には差は認めないものの、再建分節数、特に、グラフト間置して個別に再建した分節動脈数が減少した。またMD-CTで栄養動脈を同定できた43例とできなかった12例の比較でも、同定できた例では閉鎖した分節動脈数が多かった。このような再建分節動脈数の減少にもかかわらず、術中のESCP変化の検出率にはまったく差はなく、新しい戦略は妥当と思われた。

7. 術中モニタリング

従前に栄養動脈が同定されるようになり、術中モニタリングの意義も、手術戦略およびその実施の妥当性の検証へと変化している。この状況下では、モニタリングにより側副血流が十分かを監視し、その結果に応じて灌流圧(中枢血圧、CSF圧)を調整するという点で、麻酔科医が果たす役割は非常に大きい。Stealの制御を含め、これらの条件を最適化しても脊髄虚血変化がreverseできない場合、選択的灌流が検討される。

モニタリング法にはSSEP、ESCPに加え、motor evoked potential(MEP)がある。SSEPは簡便であるが、感覚神経のモニタリングであり、末梢神経・脊髄・脳の影響を受け、麻酔薬や電気ノイズにも弱く、感受性、特異性ともに低い。1988年のCrawfordらによるprospective studyで、偽陰性13%、偽陽性67%という結果から脊髄障害防止に役立たないと結論された³⁰⁾ため広く普及はしていないが、簡便さからまだ使われている。

MEPは1990年代後半の経頭蓋電気刺激の導入³¹⁾後急速に普及した。運動神経のモニタリングであり、簡便で感受性は高いが、脳・脊髄・末梢神経を反映

するため特異性が低い。また SSEP 同様麻酔薬や電気ノイズに弱く、麻酔科の負担も大きい。このような背景を反映し、25～75%まで、施設によりさまざまな cut off 値が用いられている。Okitaらは75%が最も有用性が高く、偽陰性0%、偽陽性2%と報告している³²⁾が、より鈍感な25～50%の cut off 値を用いても、より高い偽陽性率を報告しているものが多い。SafiらはMEPはSSEPより多くの情報を与えないと結論している³³⁾。

著者らが用いてきた ESCP は感覚神経のモニターと誤解されているが、実際には運動神経機能も反映する。2本の硬膜外電極を要するのが欠点であるが、脊髄のみの機能を反映するため、自験例では感受性、特異性ともに100%と非常に高い。ほかのモニターとは異なり、術後の神経機能とよい相関が得られるのも特徴である。著者は2009年、ESCPとMEPの相関を prospective に41例で比較した。MEPは経頭蓋刺激で、麻酔は筋弛緩非使用の TIVA とし、深度は BIS レベル50%となるよう留意した。この結果、モニター試行41例中モニター可能は MEP 95%、ESCP 65%で、硬膜外電極留置の困難性が示された。一方、術中モニター変化(MEPでは非脊髄性変化を除外した)は MEP (cut off 75%)で20/39、MEP (cut off 50%)で15/39、ESCP 4/26で検出され、不一致8例はいずれも MEP 変化のみが検出された。このうち MEP 変化を一過性の steal で説明可能なものは4例で、残る4例は術中因子では説明不能であった。また最終変化と術後神経機能の相関を見ると、ESCPでは偽陰性・偽陽性はなかったが、MEPでは偽陽性が2例、50% cut off MEPでは偽陰性が1例みられた。後者は大腿・下腿筋の MMT(徒手筋力テスト)は4であったが、腰筋の MMT 低下のため自立2足歩行は困難であった。

また MEP では下肢虚血も反映されるため、このパターンを知っておく必要がある。著者の経験では、下肢虚血による変化は手術操作から変化までに時間がかかるのに対し、脊髄性は手術操作後速やかに変

化する。また下肢虚血の場合、回復は遮断解除後すぐ始まるが、完全回復には時間を要する。以上、術中モニタリングは steal、脊髄栄養動脈の遮断、下肢・脳虚血、脊髄灌流圧など、手術操作と併せて判断する必要があるが、著者の経験では MEP の信頼性は ESCP には及ばない。

8. 薬理学的脊髄保護

脊髄保護目的で臨床使用されている薬剤には、ナロキソン、ステロイド、エグラボン、バルビツレート等がある。Opiate receptor antagonistであるナロキソンは、麻痺がナロキソンで軽快した症例の経験をきっかけとして1980年代後半に Acherらが使用を始め³⁴⁾、1994年には CSFD との組み合わせで脊髄障害が22%から2%に減少したと報告した³⁵⁾。その効果を疑問視する向きも多いが、著者らは脊髄障害例で上昇すると報告されている CSF 中神経興奮性アミノ酸の分析で、ナロキソン投与例ではこれらが抑制されていることを報告した³⁵⁾。

このほかの薬剤では、高血糖の弊害が指摘されインスリンが用いられているほか、術後の鎮痛・鎮静ではデクスメトミジンが有利であるとされる。大動脈遮断時の血圧管理に用いられる薬剤では、ニトログリセリンやニトロプルシドは CSF 圧を上昇させ有害とされるが、PGE1 や Ca 拮抗薬にはこの有害作用はみられない。

実験的には多数の薬剤が検討され、それぞれ保護効果が報告されている。特に NMDA 拮抗薬は有望視されている。著者らも、ラザロイド、ニコランジル虚血前投与、FK506等の保護効果を報告してきた。しかし、いずれも虚血許容時間を劇的に延長するものではなく、apoptosisあるいは progressive necrosis による遅発性脊髄障害の抑制程度の効果であり、臨床的意義は不明である。

Ⅲ 胸腹部大動脈置換術の成績

現在まで著者は、MD-CTとMRAによる栄養動脈同定、軽度低体温 DAP + 小範囲分節遮断 +

CSFD(または超低体温), ナロキソン, ESCP(MEP)モニタリングを基本戦略として胸腹部大動脈瘤の手術を行ってきた。この戦略による1995年8月から2010年3月まで150例の成績は, 30日死亡1例(Coselli公式予測値4.4例), 在院死亡6例, 脊髄障害8例(同予測値8.8例)であり, 日本胸部外科学会2008年国内集計559例の30日死亡10%より良好になっている。脊髄障害のうち半数は, 分節動脈再建不能な感染性大動脈瘤破裂例であり, これを除くと脊髄障害は2.8%であった。

国内主要施設の現況を2009年の日本胸部外科学会シンポジウム抄録から見ると, 東北大学122例(10年)で在院死8%・脊髄障害5%, 国立循環器病センター123例(6年)で在院死11%・脊髄障害6%, 神戸大学112例(年数不明)で30日死亡8%・脊髄障害13%, 大阪大学(TEVAR)87例(12年)で30日死亡1%・1年大動脈event発生12%・脊髄障害0%であり, これが国内の現況と思われる。

参考文献

- 1) Crawford ES, Crawford JL, Safi HJ, et al : Thoracoabdominal aortic aneurysms : preoperative and intraoperative factors determining immediate and long-term results of operations in 605 patients. *J Vasc Surg* 3 : 389-404, 1986
- 2) 椎谷紀彦, 安田慶秀 : 胸腹部大動脈瘤の手術. *胸部外科* 50 : 133-143, 1997
- 3) Griep RB, Griep EB : Spinal cord perfusion and protection during descending thoracic and thoracoabdominal aortic surgery : the collateral network concept. *Ann Thorac Surg* 83 : S865-S869, 2007
- 4) Griep RB, Ergin MA, Galla JD, et al : Looking for the artery of Adamkiewicz : a quest to minimize paraplegia after operations for aneurysms of the descending thoracic and thoracoabdominal aorta. *J Thorac Cardiovasc Surg* 112 : 1202-1213, 1996
- 5) Acher CW, Wynn MM, Hoch JR, et al : Combined use of cerebral spinal fluid drainage and naloxone reduces the risk of paraplegia in thoracoabdominal aneurysm repair. *J Vasc Surg* 19 : 236-246, 1994
- 6) Etz CD, Halstead JC, Spielvogel D, et al : Thoracic and thoracoabdominal aneurysm repair : is reimplantation of spinal cord arteries a waste of time? *Ann Thorac Surg* 82 : 1670-1677, 2006
- 7) Dommissie GF : The blood supply of the spinal cord. A critical vascular zone in spinal surgery. *J Bone Joint Surg Br* 56 : 225-235, 1974
- 8) 椎谷紀彦, 松居喜郎, 村下十志文ほか : 胸腹部大動脈瘤における脊髄障害の原因と術式選択—小範囲分節遮断と低体温の意義—. *日血外会誌* 6 : 531-536, 1997
- 9) Wadouch F, Arndt CF, Oppermann E, et al : The mechanism of spinal cord injury after simple and double aortic cross-clamping. *J Thorac Cardiovasc Surg* 92 : 121-127, 1986
- 10) Dapunt OE, Midulla PS, Sadeghi AM, et al : Pathogenesis of spinal cord injury during simulated aneurysm repair in a chronic animal model. *Ann Thorac Surg* 58 : 689-696, 1994
- 11) Miyamoto K, Ueno A, Wada T, et al : A new and simple method of preventing spinal cord damage following temporary occlusion of the thoracic aorta by draining the cerebrospinal fluid. *J Cardiovasc Surg (Torino)* 1 : 188-197, 1960
- 12) Blaisdell FW, Cooley DA : The mechanism of paraplegia after temporary thoracic aortic occlusion and its relationship to spinal fluid pressure. *Surgery* 51 : 351-355, 1962
- 13) Crawford ES, Svensson LG, Hess KR, et al : A prospective randomized study of cerebrospinal fluid drainage to prevent paraplegia after high-risk surgery on the thoracoabdominal aorta. *J Vasc Surg* 13 : 36-45, 1991
- 14) Hollier LH, Money SR, Naslund TC, et al : Risk of spinal cord dysfunction in patients undergoing thoracoabdominal aortic replacement. *Am J Surg* 164 : 210-213, 1992
- 15) Coselli JS, Lemaire SA, Köksoy C, et al : Cerebrospinal fluid drainage reduces paraplegia after thoracoabdominal aortic aneurysm repair : results of a randomized clinical trial. *J Vasc Surg* 35 : 631-639, 2002
- 16) Cheung AT, Weiss SJ, McGarvey ML, et al : Interventions for reversing delayed-onset postoperative paraplegia after thoracic aortic reconstruction. *Ann Thorac Surg* 74 : 413-419, 2002
- 17) Hill AB, Kalman PG, Johnston KW, et al : Reversal of delayed-onset paraplegia after thoracic aortic surgery with cerebrospinal fluid drainage. *J Vasc Surg* 20 : 315-317, 1994
- 18) Estrera AL, Sheinbaum R, Miller CC, et al : Cerebrospinal fluid drainage during thoracic aortic repair : safety and current management. *Ann Thorac Surg*

- 88 : 9-15, 2009
- 19) Wynn MM, Mell MW, Tefera G, et al. : Complications of spinal fluid drainage in thoracoabdominal aortic aneurysm repair : a report of 486 patients treated from 1987 to 2008. *J Vasc Surg* 49 : 29-34, 2009
 - 20) Dardik A, Perler BA, Roseborough GS, et al. : Subdural hematoma after thoracoabdominal aortic aneurysm repair : an underreported complication of spinal fluid drainage? *J Vasc Surg* 36 : 47-50, 2002
 - 21) Svensson LG, Rickards E, Coull A, et al. : Relationship of spinal cord blood flow to vascular anatomy during thoracic aortic cross-clamping and shunting. *J Thorac Cardiovasc Surg* 91 : 71-78, 1986
 - 22) Shiiya N, Wakasa S, Matsui K, et al. : Anatomical pattern of feeding artery and mechanism of intraoperative spinal cord ischemia. *Ann Thorac Surg* 88 : 768-771, 2009
 - 23) Shiiya N, Kunihara T, Matsuzaki K, et al. : Evolving strategy and results of spinal cord protection in type I and II thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *Ann Thorac Cardiovasc Surg* 11 : 178-185, 2005
 - 24) Etz CD, Luehr M, Kari FA, et al. : Paraplegia after extensive thoracic and thoracoabdominal aortic aneurysm repair : does critical spinal cord ischemia occur postoperatively? *J Thorac Cardiovasc Surg* 135 : 324-330, 2008
 - 25) Etz CD, Homann TM, Luehr M, et al. : Spinal cord blood flow and ischemic injury after experimental sacrifice of thoracic and abdominal segmental arteries. *Eur J Cardiothorac Surg* 33 : 1030-1038, 2008
 - 26) Laschinger JC, Cunningham JN Jr, Baumann FG, et al. : Monitoring of somatosensory evoked potentials during surgical procedures on the thoracoabdominal aorta. III. Intraoperative identification of vessels critical to spinal cord blood supply. *J Thorac Cardiovasc Surg* 94 : 271-274, 1987
 - 27) Shiiya N, Yasuda K, Matsui Y, et al. : Spinal cord protection during thoracoabdominal aortic aneurysm repair : results of selective reconstruction of the critical segmental arteries guided by evoked spinal cord potential monitoring. *J Vasc Surg* 21 : 970-975, 1995
 - 28) Yamada N, Okita Y, Minatoya K, et al. : Preoperative demonstration of the Adamkiewicz artery by magnetic resonance angiography in patients with descending or thoracoabdominal aortic aneurysms. *Eur J Cardiothorac Surg* 18 : 104-111, 2000
 - 29) Maruyama R, Kamishima T, Shiiya N, et al. : MDCT scan visualizes the Adamkiewicz artery. *Ann Thorac Surg* 76 : 1308, 2003
 - 30) Crawford ES, Mizrahi EM, Hess KR, et al. : The impact of distal aortic perfusion and somatosensory evoked potential monitoring on prevention of paraplegia after aortic aneurysm operation. *J Thorac Cardiovasc Surg* 95 : 357-367, 1988
 - 31) de Haan P, Kalkman CJ, de Mol BA, et al. : Efficacy of transcranial motor-evoked myogenic potentials to detect spinal cord ischemia during operations for thoracoabdominal aneurysms. *J Thorac Cardiovasc Surg* 113 : 87-100, 1997
 - 32) Kawanishi Y, Munakata H, Matsumori M, et al. : Usefulness of transcranial motor evoked potentials during thoracoabdominal aortic surgery. *Ann Thorac Surg* 83 : 456-461, 2007
 - 33) Keyhani K, Miller CC, 3rd, Estrera AL, et al. : Analysis of motor and somatosensory evoked potentials during thoracic and thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *J Vasc Surg* 49 : 36-41, 2009
 - 34) Acher CW, Wynn MM, Archibald J : Naloxone and spinal fluid drainage as adjuncts in the surgical treatment of thoracoabdominal and thoracic aneurysms. *Surgery* 108 : 755-761, 1990
 - 35) Kunihara T, Matsuzaki K, Shiiya N, et al. : Naloxone lowers cerebrospinal fluid levels of excitatory amino acids after thoracoabdominal aortic surgery. *J Vasc Surg* 40 : 681-690, 2004

Aortic Surgery and Spinal Cord Protection
—Changes in the Concept and the Roles of Anesthesiologists—

Norihiko SHIYA

First Department of Surgery, Hamamatsu University School of Medicine

Spinal cord ischemia during aortic surgery has been thought to result from occlusion of the feeding artery that arises from the segmental artery. This concept has recently been challenged, and it is now believed that occlusion of all the segmental arteries does not result in spinal cord ischemia, if spinal cord perfusion pressure (mean arterial pressure-cerebrospinal fluid pressure) is maintained at a high level, thanks to the presence of a rich collateral network. In this concept, anesthesiologists play a major role by monitoring ischemia and optimizing spinal cord perfusion pressure.

In this article, I outline the strategies of spinal cord protection under the current concept and the role of anesthesiologists that surgeons expect. In addition, new insights are described for when the collateral blood flow fails to maintain the spinal cord viability. Operative results of my personal experience with thoracoabdominal aortic aneurysm repair are also presented.

Key Words : Thoracoabdominal aortic aneurysm, Spinal cord injury, Spinal cord feeding artery, Collateral blood flow

The Journal of Japan Society for Clinical Anesthesia Vol.30 No.4, 2010

大血管手術の術後ケアと合併症対応

浜松医科大学外科学第一講座 教授

椎谷紀彦 ■ しいやのりひこ

key point

- ・大動脈の待機手術は、「突然死を防ぐため無症状の患者をいかに機能損失なく回復させることができるか」という手術である。
- ・最も注意すべきは中枢神経（脳・脊髄）合併症であり、術後はこの早期発見に努める。
- ・術後せん妄は軽度の広汎な脳障害による高次脳機能低下のサインであり、ICU環境や薬剤選択に注意する。
- ・脊髄障害防止には脊髄灌流圧維持が重要で、血圧維持と脳脊髄液ドレナージの適切な管理が求められる。
- ・弓部の手術では誤嚥に注意する。
- ・開胸手術後では鎮痛・排痰を十分に行い、呼吸器合併症予防に努める。

はじめに

機能回復を通じて生命予後を改善する心臓手術とは異なり、大動脈の待機手術は「突然死を防ぐため無症状の患者をいかに機能損失なく回復させることができるか」という手術である。従って、後遺障害につながる合併症を回避すること、不幸にして発生した場合には早期発見・治療を通してこれを最小限にとどめることが肝要であり、術後ケアの果たす役割は大きい。また緊急手術においては、患者が急激な状況の変化についていくことができない場合も多く、精

神面のケアも重要となる。

本稿では、大動脈疾患の病態と手術の概要、ならびに合併症回避のためのチームとして、看護師に期待されるものを概説する。

病態と手術適応

1. 大動脈瘤

待機手術の適応は、1年破裂率と手術危険率を比較して決定される。前者を高くするものには、瘤径、高齢、慢性閉塞性肺疾患（chronic

obstructive pulmonary disease;COPD), 痛み, 形態(囊状>紡錘状), 成因(解離>真性)などがある¹⁾. 後者は瘤占拠部位(弓部・胸腹部はハイリスク), 手術施設に加え, 種々の患者要因に影響される. 一般論では, 上行大動脈は55mm程度, そのほかの胸部・胸腹部大動脈は60mm程度, 腹部大動脈は50mm程度を目安に手術が行われるが, マルファン症候群や大動脈二尖弁などの背景を有する疾患群は, より早く介入される. また, 囊状瘤は小さくても破裂するため, 一定の大きさを有するものや形態変化がみられる場合は手術が勧められる.

1 歩先の まめ知識

壁張力はラプラスの法則(張力=血圧×瘤半径÷壁厚)で規定されるため, 瘤径が大きいほど破裂しやすい.

1 歩先の まめ知識

マルファン症候群とは, 骨格系異常, 水晶体偏位と心血管病変を来す常染色体性優性遺伝疾患である. 無治療では, 30歳前後で心血管病変死に至る.

2. 大動脈解離

大動脈の内膜に亀裂が生じ, 中膜に血液が入り込み, 大動脈壁が2層に剥がれたものである. もともとの腔を真腔, 壁内に新しくできた腔を偽腔(解離腔), その境目を剥離内膜, 血液が流入する内膜亀裂をエントリー, 流出する亀裂をリエントリーと呼ぶ. 急性(2週間以内)と慢性(2週間以降), スタンフォード分類A型とB型に分類される.

1 歩先の まめ知識

スタンフォード分類: 上行大動脈に解離があるものがA型, ないものがB型である.

急性A型では1時間あたり1~3%, 48時間で50%, 1週間で80%が死に至るため, 緊急手術が行われる. 主な死因は心タンポナーデで, ほかに冠動脈灌流異常による心筋虚血や急性大動脈弁閉鎖不全による心不全がある. いずれも上行大動脈が解離しているために生じるものであり, 救命のためには最低限, 上行大動脈を修復(多くは人工血管置換)しなければならない. 遠隔予後改善を目指して, 弓部大動脈までを置換範囲に含める場合もある(特にマルファン症候群や, エントリーが弓部大動脈に存在する場合など).

急性B型では通常降圧治療が行われるが, 20%程度では破裂や重要臓器灌流異常による生命の危険が及び, 緊急観血的治療を要する. 慢性期に入った大動脈解離は, 拡張瘤化した場合や合併症が生じた場合に観血的治療の対象となる. 最近では, 急性B型解離の早期慢性期にステントグラフト治療を行い, エントリーを閉鎖することで慢性期の瘤化を防ごうとする試みも行われている²⁾.

一方, 偽腔が発症後早期に血栓で閉塞する場合があります. 偽腔開存型よりも予後が良いことが知られている. このため, 急性A型でも偽腔閉塞型では保存的治療が選択される場合がある.

術式と合併症

人工血管置換手術とステントグラフト治療がある. 前者では血流を遮断して人工血管を吻合

するため、虚血および塞栓から下流の臓器を守る対策が必要である。また、解離の場合、術中の真腔・偽腔の血行動態変化により分枝灌流異常が生じ、臓器障害を来す場合がある。

後者は傷が小さく血行遮断を要さないのが利点であるが、塞栓の危険は従来手術と同等以上にある。現在臨床導入されている器具は、主要な分枝がない腹部と胸部下行大動脈瘤が適応であり、遠位弓部や胸腹部大動脈瘤では、分枝にバイパスを加えたり (debranching)、ステントグラフトに窓を開けたり (開窓型)、枝を付ける (分岐型) 試みが行われている。

以下、部位別・術式別に、特有の合併症を含め解説する。

1. 大動脈基部置換術

大動脈弁輪拡張症など、バルサルバ洞に病変を来した場合に行われる。大動脈弁閉鎖不全 (aortic regurgitation ; AR) を合併することが多く、人工弁と人工血管がつながった composite graft (人工弁付き導管) を用い、冠動脈を人工血管に再縫着するベントール手術が標準術式である。しかし、弁逆流の原因は弁尖自体ではなくバルサルバ洞拡張であることが多いため、最近では reimplantation 手術 (David) や remodeling 手術 (Yacoub) など、弁温存大動脈基部置換手術も行われる。

2. 上行・弓部大動脈置換術

胸骨正中切開で人工心肺を用いて行われる場合が多い。通常の開心術と異なる点は、循環を停止し大動脈を開放して吻合を行う場合、臓器虚血・再灌流障害を防ぐために低体温が必要なことである。中でも脳は虚血許容時間が短く、

高次脳機能障害を回避するには 20℃ 以下まで冷却したとしても、循環停止時間は 25 分未満にとどめる必要がある³⁾。このため、脳血管を最初に再建して虚血時間を短縮する方法 (arch first) や、脳血管だけは人工心肺を用いて灌流する方法 (選択的脳灌流法、脳分離体外循環法) が用いられている。静脈から血液を脳に送る方法 (逆行性脳灌流法) も用いられるが、実際に脳毛細血管を通過する血流量は数%にとどまるため、塞栓子の除去・低温の維持が主な効果と考えられる⁴⁾。

低体温は、体外循環時間の延長から出血傾向や全身炎症反応を引き起こすため、手術侵襲を増加させ、長期 ICU 管理の原因となる場合もある。このため最近では、選択的脳灌流を用いて脳を保護する場合、冷却を 28℃ 程度にとどめる試みが行われている⁵⁾。脳を除くと、このレベルの低体温でも、再建時間は許容範囲となる。

急性 A 型解離に対する手術では、エントリーの位置を確認し、手術により新たな内膜亀裂や重要臓器灌流異常が生じることを避けるため、大動脈を遮断せず (あるいは遮断解除して) 超低体温で循環停止下に手術を行う。エントリーが有効に閉鎖されていない場合、術後も嚴重な降圧管理を要する。

これらの手術で最も注意すべき合併症は、脳梗塞と一過性脳障害である。脳梗塞は、主に粥腫^{じやくしゅ}の塞栓により生じるが、その主因は人工心肺送血管のジェット血流が粥腫を遊離させること (タイヤにホースで水をかけると、泥が飛ぶ様子を想像するとよい) である。解離の場合には、分枝灌流異常が脳梗塞の原因となる場合もある。

また、一過性脳障害は、術後のせん妄として

現れる場合が多い。従来は良性のものと考えられてきたが、実は回復後も高次脳機能が低下していることが判明し、軽度の広汎な脳障害の形であると認識されている³⁾。これは脳保護が不十分であった場合に生じ、特に脳循環停止（逆行性脳灌流も含む）時間が25分を超えると増加する。

3. 下行・胸腹部大動脈置換術

左開胸（+後腹膜経路）で、遮断より末梢の大動脈を灌流しながら手術を行う場合が多いが、超低体温を用いる場合もある。抗凝固しながら肺を操作すると容易に肺出血を来し、呼吸不全の原因となる。また、腎・腸管・肝などの腹部臓器に加え、脊髄の虚血障害を来す可能性があり、この防止が最大の課題である。原因は分節動脈由来脊髄栄養動脈の血流遮断であるが、脊髄血流はほかにも鎖骨下動脈系、内腸骨動脈系から供給を受けており、これらを介する側副血流の維持が術中・術後とも重要になる⁶⁾。このため血圧を高め維持し、脳脊髄液ドレナージを行う場合が多い。

1 歩先の まめ知識

脊髄灌流圧は「平均動脈圧－脳脊髄圧」で規定されるため、脳脊髄圧を下げる目的で脳脊髄液ドレナージが行われる。

4. スtentグラフト内挿術

バネ（stent）が付いた人工血管を下流の動脈から挿入して大動脈病変部の血管内で広げ、病変を中から覆う治療である。良い治療効果を得るためには、中枢と末梢に健常な圧着部分を十分長く確保することが重要である。

表 1 せん妄と薬剤

<p><せん妄を誘発する可能性があるもの></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ベンゾジアゼピン系睡眠薬 ・麻薬 ・プロポフォール（全身麻酔薬） <p><せん妄の治療に有用なもの></p> <ul style="list-style-type: none"> ・セレネース[®]（ハロペリドール） →錐体外路症状、悪性症候群、QT延長に注意 ・セロクエル[®]（クエチアピンフマル酸塩） →催眠作用あり、血糖上昇に注意 ・リスパダール[®]（リスペリドン） →粘膜からも吸収、催眠作用弱い ・プレセデックス[®]（デクスメトミジン塩酸塩） →開心術後のせん妄抑制の報告あり

合併症としては、血管内操作に伴う塞栓症、分枝動脈閉塞による臓器障害（脊髄など）、太いカテーテルシースによる血管損傷に加え、瘤内への血流の漏れ（endoleak：エンドリーク）やstentグラフトの移動など、特有なものがある。後2者は治療効果を失わせる可能性もあり、注意が必要である。

1 歩先の まめ知識

endoleak（エンドリーク）：中枢・末梢から（タイプⅠ）、分枝逆流（タイプⅡ）、stentグラフト継ぎ目から（タイプⅢ）、人工血管布の漏れ（タイプⅣ）に分類される。

術後管理と看護師の役割

術後管理の多くは通常の開心術と同様であるが、大血管手術では、まず中枢神経障害の有無を確認する必要がある。このため、術後特別な意味なく鎮静を開始することは厳に慎まなければならない。覚醒し、神経学的異常がないことを確認できれば、必要に応じて鎮静を開始してよいが、出血がなく呼吸循環動態に異常がなけ