

術後の対麻痺を回避するための取り組み

鎌田 武
田中良一湊谷謙司
吉岡邦浩脇本将寛
安孫子明彦門崎 衛
岡林 均*

はじめに

胸部下行大動脈瘤に対する胸部ステントグラフト内挿術 (TEVAR) 後の対麻痺, 膀胱直腸障害といった脊髄虚血 (SCI) は, 患者の QOL を著しく低下させる重篤な合併症の一つである. TEVAR 後 SCI の発生率は 2.5~10.0% と報告¹⁻⁵⁾ によりばらつきがあるものの, 一般的に従来の人工血管置換術の発生率と比較し低い傾向にあると考えられてきた. Bavaria ら⁶⁾ は, TEVAR と人工血管置換術では有意差をもって TEVAR のほうが術後の SCI の発生率が低い (TEVAR: 3%, 人工血管置換術: 14%) と報告した. その一方で 2007 年の Coselli ら⁷⁾ の報告から, 2,286 例の胸腹部大動脈瘤術後の SCI の発生率は 3.8% であり, TEVAR 後の SCI の発生率が必ずしも人工血管置換術と比較して低いとは限らないと考えられる. 術後 SCI の危険因子については, 腹部大動脈瘤術後³⁾, 腹部大動脈瘤の合併⁸⁾, 年齢⁵⁾, 性別⁸⁾, 長いステントグラフトの留置範囲⁴⁾, 左鎖骨下動脈の閉塞¹⁾, 術中・術後の低血圧²⁾ などさまざまな報告がなされ, 現状では術後 SCI 発生の詳細なメカニズムは解明されていない. そこでわれわれは, TEVAR 後の SCI を回避するための次のような取り組みを行っている.

- 1) Adamkiewicz 動脈の術前評価.
- 2) Adamkiewicz 動脈への側副血行路形成を

意識した TEVAR の留置計画.

- 3) 術中 MEP 測定とそれを考慮した麻酔計画.
- 4) 脊髄灌流圧の維持.
- 5) 脳脊髄液 (CSF) ドレナージ.

これらの取り組みについて, いくつかの具体的な症例を提示しながら報告する.

I. Adamkiewicz 動脈の術前評価

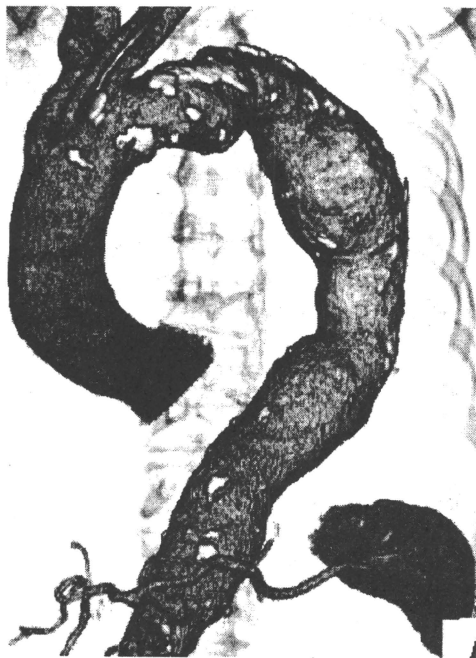
TEVAR 後の SCI の発生率が人工血管置換術と比較し必ずしも低いとはいえ, その発生メカニズムもはっきり解明されていないことは前述した. そのためわれわれは術前に CTA や MRA を用いて, 脊髄への重要な血液供給路である Adamkiewicz 動脈とそれに連続する肋間動脈 (CSA) を同定し, その CSA を可能な限り温存するようにステントグラフトを留置している. CSA の分岐位置と胸部大動脈瘤の位置関係から, ステントグラフトの留置範囲の決定に苦慮した症例を提示する.

症例 1 73 歳, 男.

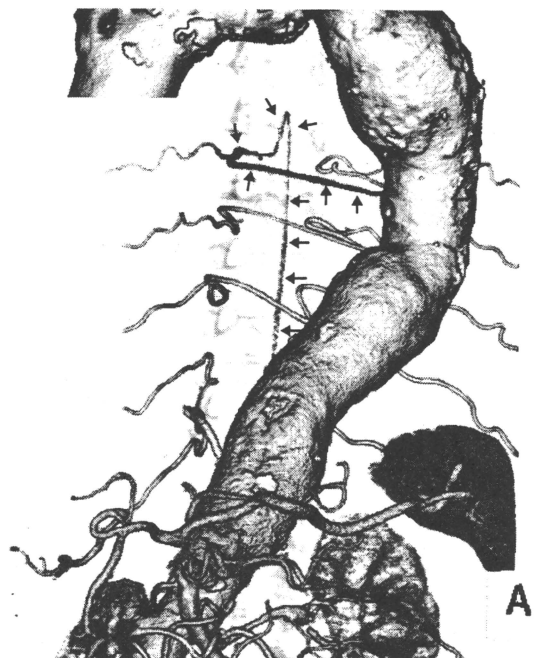
胸部下行大動脈に最大短径 60 mm の紡錘状動脈瘤を認め, Th9 より末梢の胸部下行大動脈も約 40 mm の拡張を認めた (図 1a). 術前 CTA では Adamkiewicz 動脈は右 Th7 の肋間動脈から連続 (図 1b) していたが, 大動脈から分岐する起始部に狭窄を認め (図 1c), 左 Th10 から前脊髄動脈への側副血行路の形成を認めた (図

キーワード: TEVAR, Adamkiewicz 動脈, 脊髄虚血, 予防

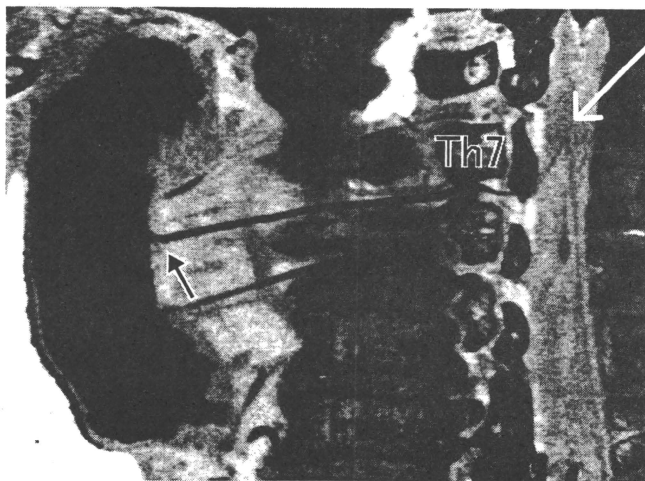
*T. Kamada, K. Minatoya (講師)〈心臓血管外科〉, M. Wakimoto, M. Kadosaki (准教授)〈麻酔科〉, R. Tanaka (講師), K. Yoshioka (准教授)〈循環器放射線科〉, A. Abiko (心臓血管・腎・内分泌外科), H. Okabayashi (教授)〈心臓血管外科〉: 岩手医科大学.



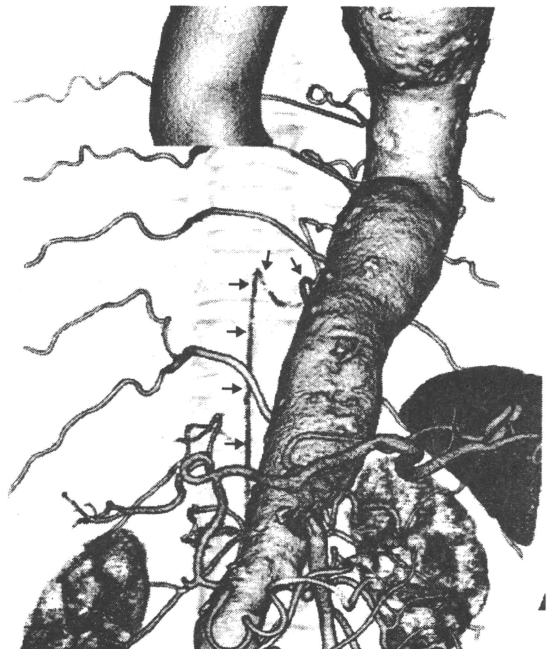
a. 胸部下行大動脈に最大短径 60 mm 大の紡錘状動脈瘤と、Th9 より末梢に 40 mm 大の拡張病変を認める。



b. Adamkiewicz 動脈は右 Th7 肋間動脈より連続している。



c. Th7 肋間動脈は大動脈から分岐する起始部に狭窄病変を認める (矢印)。



d. 左 Th10 から前脊髄動脈への側副血行路を認める。

図 1. 症例 1. 画像所見

1d).

本例の場合、拡張した下行大動脈全体をステントグラフトでカバーすると Th7, Th10 両者を塞ぐこととなる。ステントグラフトの留置範囲の長さ⁴⁾や末梢留置位置⁵⁾が、術後 SCI の危険因子に

なるとの報告があり、本例において Th7, Th10 双方をステントグラフトで閉塞することは、術後対麻痺発生の高リスクと判断された。そのため Th8 レベルで約 2 cm の landing zone を確保し、ステントグラフトを留置することとした。術後に

SCIの所見はなく、また術後造影検査でエンドリークも認めなかった。術前のAdamkiewicz動脈とCSAの同定が、ステントグラフトの留置範囲を決定するうえで重要な鍵となる症例であった。TEVARの場合、人工血管置換術と異なりCSAを再建することができないため、術前にCSAを同定し可能な限りそれを温存する治療計画は、術後SCIを予防する重要な要素の一つであると考えられる。

II. Adamkiewicz動脈への側副血行路形成を意識したTEVARの留置計画

術前同定したCSAが胸部大動脈瘤そのものから分岐している症例や、CSAを温存するとlanding zoneが短くエンドリークが強く危惧される症例では、やむをえずステントグラフトでCSAを閉塞することとなる。CSAをステントグラフトで閉塞しても必ずしも術後SCIを発生するとは限らないが、Kawaharadaら⁹⁾はCSAをステントグラフトで閉塞した症例で約10%に術後SCIの所見を認めたと報告している。同報告では、CSAを温存した症例では術後SCIは認めていないことから、CSAの閉塞はSCIの危険因子と考えられる。CSAを閉塞したにもかかわらず術後SCIが発生しない背景として、CSA閉塞後のAdamkiewicz動脈への新たな側副血行路の形成が指摘¹⁰⁾されている。われわれが経験した症例を提示する。

症例2 62歳、男。

胸部下行大動脈（気管分岐部の高さ）に最大短径48mmの動脈瘤を認め、その末梢（横隔膜の高さ）に最大短径65mm大の嚢状動脈瘤を認めた（図2a）。Adamkiewicz動脈は左Th10肋間動脈から分岐していた。動脈瘤とTh10肋間動脈が近く温存は困難であったため、やむをえずこれを閉塞することとし、ステントグラフトは大動脈弓部から腹腔動脈直上まで留置した。術後造影でエンドリークは認めなかった（図2b）。左Th10肋間動脈はステントグラフトにより起始部は閉塞していたが、大動脈の近位部から全長にわたり描出され、Adamkiewicz動脈への連続性を認めた（図2c）。

本例ではCSA閉塞後に新たな側副血行路が形成され、Adamkiewicz動脈への灌流が維持され

ていたことがわかる。しかしながら現在、CSA閉塞後に確実にAdamkiewicz動脈への側副血行路が形成されるかどうか、また側副血行路が形成されたとしても、どこからAdamkiewicz動脈へ灌流されるかは、術前から予測することは困難である。CSA閉塞後の側副血行路としては、Yoshiokaらの報告¹¹⁾が参考となる。Yoshiokaraは、高度の動脈硬化により約23%の頻度でAdamkiewicz動脈を分岐する肋間動脈が大動脈の起始部で閉塞し、側副血行路が形成されていると報告しており、新たに形成された側副血行路として肋間動脈の筋枝¹²⁾、内胸動脈¹³⁾、左胸背動脈¹⁴⁾をあげている。われわれはこれらの報告をもとにステントグラフトの留置範囲を決定している。すなわちステントグラフトによりCSAを閉塞する症例では、できる限り閉塞するCSA近傍の肋間動脈を温存し、左鎖骨下動脈の血流も温存することに留意している。このようなCSA閉塞後の側副血行路の形成を意識したlanding zoneの設定も、術後のSCIを予防する一つの重要な要素であると考えている。

III. 運動誘発電位（motor evoked potential : MEP）の術中モニタリング

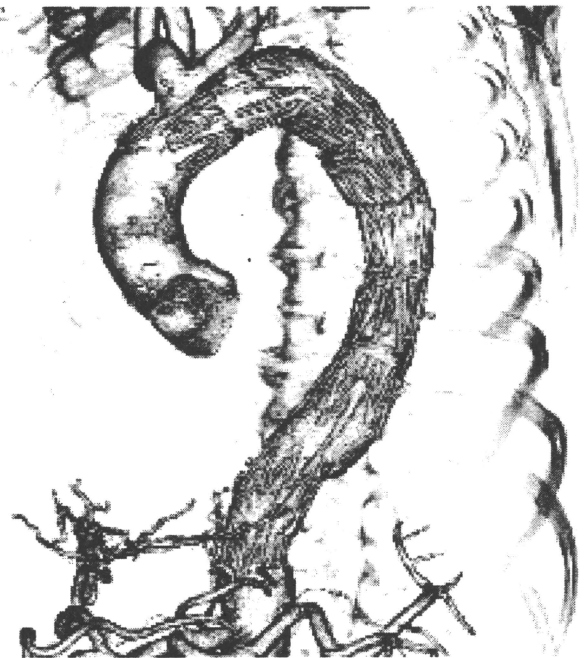
MEPを術中施行することで、虚血性脊髄神経障害の発生を早期に疑うことができる。TEVAR施行時にMEPの低下を認めた場合には、術後SCI発症の可能性を念頭におき、早期に血圧のコントロールを行いSCIの予防に最善を尽くす必要がある。またCSA近傍にステントグラフトを留置した症例では、ステントグラフト留置後のバルーンによる圧着（touch up）の際、MEPが一過性に低下することがある。多くはバルーンによるCSAの一時的な閉塞によるMEPの低下と考えられるが、CSA近傍でのtouch upは、plaque shiftによるCSAへの塞栓症の可能性もあるため、十分な注意が必要である。またMEPモニタリングが適正に行われるための麻酔計画も重要となるが、その詳細は後述することとする。

IV. 脊髄灌流圧の維持

脊髄を栄養する血管は単一ではなく、数多くの側副血行路が存在する（collateral network concept）ことが明らかになってきた。ステントグラ



a. 胸部下行大動脈（気管分岐部の高さ）に最大短径 48 mm，横隔膜の高さに 65 mm 大の動脈瘤を認める。



b. 大動脈弓部から腹腔動脈直上までステントグラフトを留置し，エンドリークは認めていない。



c. 左 Th 10 肋間動脈はステントグラフトで起始部は閉塞しているが，近位部から描出され，Adamkiewicz 動脈への連続性が確認される。

図 2. 症例 2. 画像所見

フト留置により一部の脊髄栄養血管が閉塞しても，残った側副血行路からの血流を生かすことで SCI を回避できる可能性がある。観血的動脈圧・中心静脈圧のモニタリングを行い，適切な前負

荷・後負荷コントロールにより動脈圧を比較的高く（平均動脈圧 80 mmHg 以上）維持し，低灌流を避けることが重要である。また脊髄灌流圧は動脈圧と脳脊髄圧との差によって決定されるため，

症例に応じて脳脊髄液ドレナージ (CSF ドレナージ) を併用することで、脊髄へのさらなる血流増加が期待できる。

V. 神経学的モニタリングおよびそれを考慮した麻酔計画

MEP は吸入麻酔薬・筋弛緩薬・硬膜外麻酔の影響を受けるため、モニタリングを妨げず利用するためには麻酔法も考慮する必要がある。吸入麻酔薬は濃度に応じて MEP を抑制するため、偽陽性 (脊髄虚血がないにもかかわらず MEP が消失する) の原因となる。これを避けるため、吸入麻酔薬濃度は執刀前から一定 (sevoflurane で 0.5~1.0% 程度) とし、変化させない。同時に短時間作用性の静脈麻酔薬 (propofol) を併用し、麻酔深度の変更が必要な場合にはこれを増減する。筋弛緩薬は末梢神経・筋接合部で運動神経遮断作用をもち、やはり MEP 偽陽性の原因となるため、蓄積性がなく比較的短時間のうちに作用が消失するもの (rocuronium) を選択し、かつ気管挿管時に必要最低限の量 (0.6 mg/kg) を用いるのみとして術中は追加投与しない。一方で、MEP 測定時の経頭蓋電気刺激の侵襲はそれほど小さくなく、麻酔深度が不足している場合は容易に体動を生じるため、超短時間作用性の麻薬性鎮痛薬 (remifentanyl : 0.25~0.50 μ g/kg/分) を用いて十分な鎮静を図る。硬膜外麻酔は手術創の大きな症例において有効な鎮痛法であるが、硬膜外に投与された局所麻酔薬はその一部が硬膜を通して脊髄神経に作用するため、こちらも MEP 偽陽性の原因となりうる。術中は前述のとおり、remifentanyl による鎮静を図り、硬膜外麻酔は術後鎮痛法と割り切って使用する。

VI. 脳脊髄液 (CSF) ドレナージ

山田¹⁵⁾ は、CSF ドレナージによる合併症として穿刺部の硬膜外血腫、髄膜炎、頭蓋内の硬膜外血腫などを報告しており、Weaver ら¹⁶⁾ は 3.2% で血腫による神経障害が出現したと報告している。当院では TEVAR の際の CSF ドレナージチューブの留置を以前は手術前日に行っていた。しかし、前述したような CSF ドレナージチューブ留置による合併症の可能性があること、当院での経験から TEVAR 時に CSA が完全に温存でき

た症例では術後 SCI を認めていないこと、Kawaharada ら⁹⁾ も同様の結果を報告していることが根拠となり、現在は術後に対麻痺の症状が出現した場合に CSF ドレナージを行うことにしている。なお TEVAR 時に CSA をステントグラフトで閉塞する症例にのみ、術前から CSF ドレナージチューブの留置を行っている。

おわりに

- 1) TEVAR は人工血管置換術と比べ低侵襲であり、高齢者や高リスク例を中心に治療が行われ始め、現在はその対象例や解剖学的適応範囲が拡大しつつある。
- 2) 一方で、TEVAR 後の SCI に関する発生率、発生機序、危険因子などは未知な点も多く、今後の解明がまたれるところである。
- 3) CSA を術中再建できない TEVAR では、CSA の温存を心がけるステントグラフトの留置計画はもちろん、麻酔、術後管理を含めた全身管理など、多角的に SCI 予防に取り組むことが重要であると考えられた。

文 献

- 1) Buth J, Harris PL, Hobo R et al : Neurologic complications associated with endovascular repair of thoracic aortic pathology ; incidence and risk factors ; a study from the European Collaborators on Stent/Graft Techniques for Aortic Aneurysm Repair (Eurostar) registry. *J Vasc Surg* 46 : 1103-1111, 2007
- 2) Chiesa R, Melissano G, Marrocco-Trischitta MM et al : Spinal cord ischemia after elective stent-graft repair of the thoracic aorta. *J Vasc Surg* 42 : 11-17, 2005
- 3) Cheung AT, Pochettino A, McGarvey ML et al : Strategies to manage paraplegia risk after endovascular stent repair of descending thoracic aortic aneurysms. *Ann Thorac Surg* 80 : 1280-1289, 2005
- 4) Amabile P, Grisoli D, Giorgi R et al : Incidence and determinants of spinal cord ischaemia in stent-graft repair of the thoracic aorta. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 35 : 455-461, 2008
- 5) Feezor RJ, Martin TD, Hess Jr PJ et al : Extent of aortic coverage and incidence of spinal cord ischemia after thoracic endovascular aneurysm repair. *Ann Thorac Surg* 86 :

- 1809-1814, 2008
- 6) Bavaria JE, Appoo JJ, Makaroun MS et al : Endovascular stent grafting versus open surgical repair of descending thoracic aortic aneurysms in low-risk patients : a multicenter comparative trial. *J Thorac Cardiovasc Surg* **133** : 369-375, 2007
- 7) Coselli JS, Bozinovski J, LeMaire SA : Open surgical repair of 2,286 thoracoabdominal aortic aneurysms. *Ann Thorac Surg* **83** : S862-S864, 2007
- 8) Martin DJ, Martin TD, Hess PJ et al : Spinal cord ischemia after TEVAR in patients with abdominal aortic aneurysms. *J Vasc Surg* **49** : 302-307, 2009
- 9) Kawaharada N, Morishita K, Kurimoto Y et al : Spinal cord ischemia after elective endovascular stent-graft repair of the thoracic aorta. *Eur J Cardiothorac Surg* **31** : 998-1003, 2007
- 10) Schurink GWH, Nijenhuis RJ, Backes WH et al : Assessment of spinal cord circulation and function in endovascular treatment of thoracic aortic aneurysms. *Ann Thorac Surg* **83** : S877-S881, 2007
- 11) Yoshioka K, Niinuma H, Ehara S et al : MR angiography and CT angiography of the artery of Adamkiewicz : state of the art. *Radiographics* **26** : S63-S73, 2006
- 12) Yoshioka K, Niinuma H, Ogino Y et al : Three-dimensional demonstration of the collateral circulation to the artery of Adamkiewicz with 16-row multislice computed tomography. *Ann Thorac Surg* **81** : 749, 2006
- 13) Yoshioka K, Niinuma H, Kawazoe K et al : Three-dimensional demonstration of the collateral circulation to the artery of Adamkiewicz via internal thoracic artery with 16-row multislice CT. *Eur J Cardiothorac Surg* **28** : 492, 2005
- 14) Yoshioka K, Tanaka R, Kamada T et al : Three-dimensional demonstration of the collateral circulation to the artery of Adamkiewicz via the thoracodorsal artery with multi-slice computed tomography angiography. *Eur J Cardiothorac Surg* **37** : 1234, 2010
- 15) 山田達也 : 下行大動脈手術における脊髄保護法—脊髄ドレナージの意義. *LiSA* **17** : 124-128, 2010
- 16) Weaver KD, Wiseman DB, Farber M et al : Complications of lumbar drainage after thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *J Vasc Surg* **34** : 623-627, 2001

SUMMARY

Strategies for Prevention from Spinal Cord Ischemia during Thoracic Endovascular Aortic Repair

*Takeshi Kamada, Department of Cardiovascular Surgery, Iwate Medical University, Morioka, Japan
Kenji Minatoya, Masahiro Wakimoto, Mamoru Kadosaki, Ryoichi Tanaka, Kunihiro Yoshioka, Akihiko Abiko, Hitoshi Okabayashi*

Spinal cord ischemia (SCI) is one of the most serious complications in patients who undergo thoracic endovascular aortic repair (TEVAR). The incidence of SCI after TEVAR has been supposed to be lower than the one after traditional open surgical repair. However, not a few cases regarding SCI after TEVAR have been reported recently. Since the detailed mechanism of the SCI is still not fully understood, preventive strategies against SCI including preoperative identification of critical segmental artery (CSA) applying the artery of Adamkiewicz, preservation of the CSA, motor evoked potential (MEP) monitoring, and cerebrospinal fluid (CSF) drainage are routinely performed during TEVAR in our practice.

KEY WORDS

TEVAR/the artery of Adamkiewicz/spinal cord ischemia/prevention

*

*

*

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

植松 美幸^{*1,2} 中野 喜隆^{*2,3} 松川 紘大^{*2,3}
 宇都宮 隆平^{*2,3} 中村 亮一^{*2,4} 村垣 善浩^{*2,5,6}
 伊関 洋^{*2,5,6} 青見 茂之^{*2,7} 梅津 光生^{*2,3}

Development of an Image-based Navigation System to Improve the Safety and the Reliability for Aortic Vascular Surgery

Miyuki Uematsu^{*1,2}, Yoshitaka Nakano^{*2,3}, Kodai Matsukawa^{*2,3},
 Ryuhei Utsunomiya^{*2,3}, Ryoichi Nakamura^{*2,4}, Yoshihiro Muragaki^{*2,5,6},
 Hiroshi Iseki^{*2,5,6}, Shigeyuki Aomi^{*2,7}, and Mitsuo Umezu^{*2,3}

Abstract --- To facilitate the accurate orientation of the surgical fields, we had developed a Multidimensional CT-based navigation system and clinically applied in thoracoabdominal aortic aneurysm repair with selective reconstruction of Adamkiewicz artery. Thirty patients who had thoracoabdominal aortic aneurysm were studied using Multidimensional CT imaging to identify their Adamkiewicz artery preoperatively. During navigation, the pointer location was measured by the sensor in the surgical field, and simultaneously, anatomical structures were visualized by the three-dimensional images. Then the position of the targeted intercostal arteries were successfully found in the real field, the targeted arteries and major visceral arteries were reconstructed. Hospital deaths were one patient and there was no paraplegia. A new navigation system was effective to improve an accurate orientation. Our clinical experiences exhibited that this system for thoracoabdominal aortic aneurysm repair provides a safe and effective surgery.

Keywords: aortic vascular surgery, surgical navigation system, three-dimensional imaging

1 はじめに

手術を行う際、医師には患者の解剖学的所見をもとに、実際に見えない血管や骨格構造を正確に把握し、手術の目的とする部位にアプローチする能力が求められる。この医師が見ている部位から目的部位までの位置関係を把握する能力を支援する手術ナビゲーションシステムが開発されている。これは、患者の身体の上で

指し示すポイントの先端を CT や MRI の画像上にリアルタイムで表示し、目的部位とポイントの位置の関係を明確にすることで視覚的に支援するシステムである。

手術ナビゲーションは、脳神経外科、整形外科、放射線治療、耳鼻科等で利用されており、商用のシステムもある[1][2]。ナビゲーションの施行には、画像空間と手術中の患者空間との位置合わせ(レジストレーション)が重要な要素となる。そのため、対象とする臓器の形状や動きが無視できるほど小さいことを利用し、精度の向上を行っている。商用で用いられる治療領域ではレジストレーションに剛体とみなせる骨を用いている。例えば、骨の形状を多点計測して画像を最適な位置に合わせる方法や、骨の上にレジストレーション用のマーカを打ち込んで、手術中に画像を撮像し、マーカの位置も解剖学的構造とともに取得して位置合わせする方法が用いられている。これらの工夫により、1mm 以下のレジストレーション精度でナビゲーションを実現するシステムもある。

このように、手術ナビゲーションは精密さを要する手術を支援し、手術の安全性を向上させている。一方で、外科手術には、低侵襲手術が行えず、ほとんどが開胸

*1 国立医薬品食品衛生研究所薬品部

*2 東京女子医科大学・早稲田大学連携先端生命医学研究施設(TWIns)

*3 早稲田大学大学院先進理工学研究科生命理工学専攻

*4 千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻

*5 東京女子医科大学先端生命医学研究所先端工学外科分野

*6 東京女子医科大学脳神経センター脳神経外科

*7 東京女子医科大学心臓病センター心臓血管外科

*1 Division of Medical Devices, National Institute of Health Sciences

*2 Tokyo Women's Medical University / Waseda University Joint Institution for Advanced Biomedical Sciences

*3 Bioscience and Biomedical Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Waseda University

*4 Division of Artificial Systems Science, Graduate School of Engineering, Chiba University

*5 Faculty of Advanced Techno-Surgery, Institute of Advanced Biomedical Engineering & Science, Tokyo Women's Medical University

*6 Department of Neurosurgery, Tokyo Women's Medical University

*7 Department of Cardiovascular Surgery, Tokyo, Women's Medical University

や開腹を伴う手術である領域もある。そのひとつが胸腹部大動脈瘤手術である。日本胸部外科学会の 2007 年の報告によれば、2005 年に胸部大動脈瘤の手術は 8,907 件行われたが、うちステントによる低侵襲治療は 1 割程度で、ほとんどが開胸下の人工血管置換術となっている[3]。さらに開胸下に行われる手術は侵襲が大きく、手術リスクも高く、他科の手術に比べても難易度が高い。胸腹部大動脈瘤の手術は、死亡率が 7-11%で、平均 9%ほどある。また、命が助かっても合併症である対麻痺(下半身麻痺)になる危険性がある。その発生率は各施設によって異なるが、2-27%ほどであり、平均 10%と報告されている[4]。

高リスクな手術の安全性の向上は切実な課題である。しかし、全世界的にみても開胸・開腹を伴う手術に対応するナビゲーションシステムは十分な臨床応用が行われていない。それは、開胸・開腹を伴う手術では、臓器の位置・形状が変化しやすく、一定精度での位置特定が困難なためである。そこで近年、筆者らは、独自に開発・臨床を重ねてきた脳腫瘍外科領域の手術ナビゲーションシステム[5]をベースに、胸腹部大動脈瘤手術における手術リスクを低減し、安全性向上を図るためのナビゲーションシステムを開発してきた[6]。

手術リスクのひとつである対麻痺を防ぐには、手術後も大動脈から脊髄への血流を十分に確保できることが重要である。それには大動脈から肋間動脈を通り、脊髄へ血流を送る間に存在する Adamkiewicz 動脈を同定し、その血流を温存することが有効であるとされる[7][8]。まず、事前の画像診断で Adamkiewicz 動脈の位置を特定し、そこにつながる肋間動脈を予め調べておく。そして、手術中にその肋間動脈を特定し、人工血管につないで血流を温存する。このとき、それ以外の肋間動脈の再建を省略して手術時間や大動脈遮断時間を短縮し、作業効率をあげる。画像技術の進歩で、事前の画像診断で温存すべき肋間動脈を特定できるようになったが、実際の患者を前にその肋間動脈の位置・走行を把握することは、経験の多い医師でさえもときに難しいという。

そこで筆者ら開発したのが、Virtual Reality 技術を用いて MDCT (Multidimensional CT: 以下、CT) の画像を 3 次元再構築したモデルを利用するナビゲーションシステムである。これは、手術者が重要と考え、探索の目標にする血管と周辺の位置及び相対関係を正確かつ直感的に把握することを支援する。文献[6]では、システムのプロトタイプを完成させ、9 例の臨床応用を行った内容について報告した。患者ごとに異なる血管の走行によって、レジストレーションに用いる特徴点の選択が限られ、ナビゲーションの水準に差が認められた。そこで、特徴点の配置によってタイプ分類を行い、それぞれのナビゲーション水準を示した。

本論文では、その後が続けて行った 30 例の臨床結

果をもとに、次の 3 点によって臨床用システムの有効性を示す。1) 重要な血管の位置をナビゲーションで特定できること、2) 手術中に患者の体内で見えない血管の走行も CT 画像から血管・骨などの CG モデルを作成して呈示することで容易に把握できること、3) 手術後の対麻痺の発生率である。そして、3 名の医師がシステムを利用する間に見えてきた課題を示し、より臨床で使いやすいシステムへ改良した内容について報告する。

2 大血管ナビゲーションシステム

2.1 大動脈周辺の解剖学的位置関係

大動脈周辺の解剖学的位置関係を図 1 に示す。大動脈(a)は身体の中心(体軸)を通る血管であるが、体軸のやや左側に椎骨(b)に沿うように位置する。脊柱は頸椎(cervical vertebrae)、胸椎(thoracic vertebrae)、腰椎(lumbar vertebrae)にわけられ、それぞれ 7 個(C1-C7)、12 個(Th1-Th12)、5 個(L1-L5)からなる。これら椎骨の間には椎間板があり、胸椎には肋骨(c)が結合している。この肋骨の間に沿って存在する血管を肋間動脈(d)という。この肋間動脈から分岐し、ヘアピン状にカーブしながら脊髄(e)に血流を供給する血管が 1 本あり、それを Adamkiewicz 動脈(f)という。この Adamkiewicz 動脈の位置は個人差があるため、手術前の診断画像から探しておく必要がある。こうして同定された Adamkiewicz 動脈につながる肋間動脈(グレー)が温存すべき血管(目標血管)であり、大動脈内壁から見える開口部(g)のうち目標血管につながる開口部の位置(点線で囲まれた部位)をナビゲーションによって特定する。

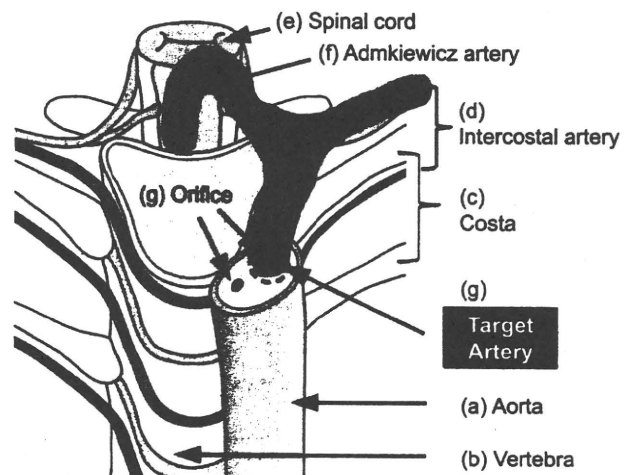


図1 大動脈周辺の解剖学的位置関係

Fig.1 Anatomical relationships between the aorta and the

2.2 本システムの特制制約条件

大動脈手術を対象にしたナビゲーションシステムの構築にあたり、従来の商用ナビゲーションが臨床利用されている脳神経外科、整形外科などの手術と比べ、異なる条件を下記に示す。

- 1) 多量の出血や脳の虚血(血流が不足すること)を防ぐため、手術時間は限られる。特に、大動脈遮断後はナビゲーション設定にかけられる時間的余裕はない。
- 2) 時間・作業の制限から、手術中に MRI 画像を撮像し、確認することができない。
- 3) 画像と患者の実際の身体とで同一点であることを確実にするマーカをなるべく変形のない部位(骨など)に打ち込んで撮影することができない。
- 4) 画像撮影時と手術時では体位が異なる。
- 5) 重要な血管の位置と走行が確認できることが第一の目標である。

これらの条件を考慮し、ナビゲーションシステムは次のような仕様とする。

- 1') ナビゲーション設定は大動脈遮断前に行う。
- 2') 手術前に撮影した画像を用いる。
- 3') 手術者が手で触って見当をつけることができる解剖学的に特徴のある点をレジストレーション点とする。
- 4') 画像撮影時は仰臥位、手術時は側臥位であるが、患者への負担を考慮し、画像撮影はルーチンの範囲内で行う。大動脈は体軸に近く、目的血管の位置誤差が小さくなるレジストレーションを行う。
- 5') 血管走行を直感的に把握できるよう、画像はセグメンテーションを行った上で3次元的に表示する。
- 6') 温存する肋間動脈の位置は、血管の起始部を中心に半径5.0mmの範囲(特に頭足方向)で特定することを目標とする。この値は、隣り合う血管と間違えない範囲として設定する。隣り合う血管の間隔は頭足方向に20mm~30mm程度であるため、その4分の1(5.0mm)以内の位置ずれでは、十分に血管の位置を識別できる。

2.3 ナビゲーションシステムの構成

本システムは次の4つの要素、①ポインタ、②光学式3次元位置計測器、③ナビゲーション用PC、④3次元サーフェスモデル表示用PCで構成される。これらの配置を図2に示す。①-④の数字は図中の数字に対応する。ポインタは光学式3次元位置計測器(Polaris[®], Northern Digital Inc.)で手術室の実空間での任意の点を計測する際に用いる。光学式3次元位置計測器はポインタが指し示した先端の位置、姿勢を計測すると、ナビゲーション用PCに結果を送る。手術室の実空間とコンピュータ画像空間の患者モデルレジストレーションが行われると患者の画像空間で仮想ポインタが表示され、リアルタイムのポインタ位置が確認できる。CT画像は3方向(Axial, Sagittal, Coronal)の断面図で表され、患部周辺

の詳細な情報を確認するために用いる。また血管は細く長い場合、断面によっては点となって表示されることがある。この場合、血管の走行を立体的にイメージすることが難しいため、3次元サーフェスモデルも同時に表示させる。ナビゲーション用PCと3次元サーフェスモデル表示用PCはLANケーブルで接続されており、ナビゲーション用PCからUDP通信で送られてくるポインタの位置情報を3次元サーフェスモデル上でリアルタイムに更新、再描画する。図3は手術者が血管ファントムの肋間動脈の開口部の位置をポインタで指した際に3次元サーフェスモデルで確認している。

2.4 画像の種類と使用用途

患者体内の解剖学的情報の表示には、術前に診断用に異なるシーケンスで撮影した2種類のCTの画像を用いる。1つは大動脈の走行を確認するために撮る画像(以下、大局画像)、もう1つはAdamkiewicz動脈の位置を特定するために撮る画像(以下、局所画像)である。図4に大局画像、図5に局所画像の例を示す。大局画像は広範囲を撮影しているが、スライス厚が1.5mmであり、肋間動脈の走行も確認できない。局所画像はスライス厚が0.5mmであり、Adamkiewicz動脈の描出が可能で、大局につながる肋間動脈を同定するのに十分なスペックである。大局画像は開胸前に肋骨のレベルと血管走行との位置関係を確認し、皮膚の切開位置を決定するために用いる。局所画像は開胸後、癒着部位等の剥離を行い、大動脈を露出させた後、実際に大動脈を遮断する前に重要な肋間動脈の位置と走行を把握するために用いる。

2.5 セグメンテーション

手術前の準備として、CT画像のボリュームデータから関心領域を部位ごとに区別できるようにするため、セグメンテーションを行う。一連の作業はバイオメディカルイメージングソフトウェア(Analyze[™], Mayo Clinic)を使用して行う。画像中のCT値に応じて、大動脈、肋間動脈、骨といったそれぞれの領域を塗り分ける。基本はCT値に基づく自動抽出を行うが、CT値が重複して自動処理できない部位については手作業で抽出する。そして、各領域の輪郭を抽出して3次元再構築し、部位ごとのサーフェスデータへ変換する。

サーフェスデータの表示には、3次元形状の描画に優れたライブラリであるOpenGLを用いて自作したソフトウェアを用いる。色や透明度を変更可能とし、拡大縮小しながら360°自由な視点から表示することで、全体における各部位の位置関係を観察可能とする。この直感的な立体構造の表示法に加え、より詳細な解剖学的位置関係を把握可能とするため、ボリュームデータを上下、前後、左右の3軸方向の断層画像で表示し、同時に確認可能とする。

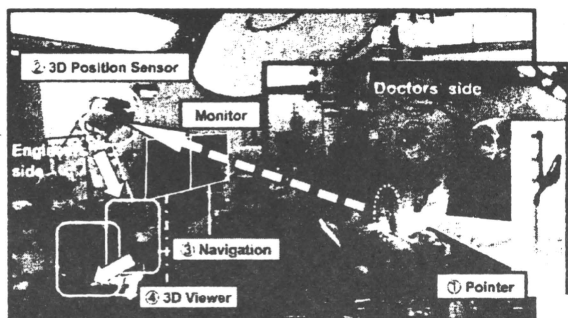


図 2. 手術室におけるナビゲーションシステムの配置
Fig.2 Layout of a navigation system in an operation room

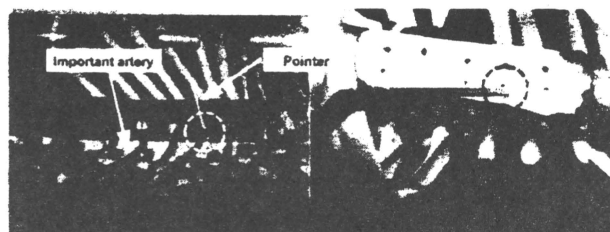


図 3. ファントムを用いた肋間動脈探索の様子
Fig.3 Searching an important intercostal artery (phantom)

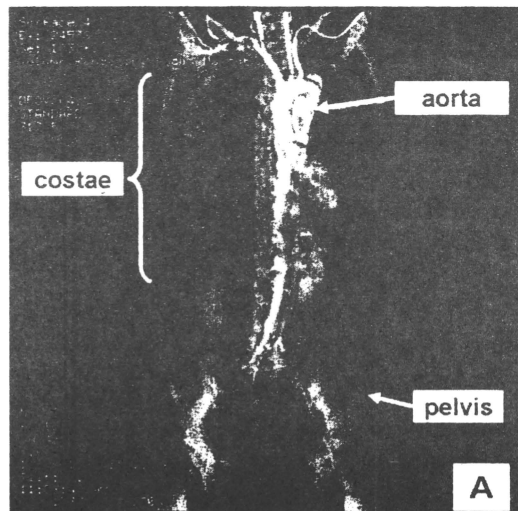


図 4. 大局画像
Fig.4 3D Image (Global)

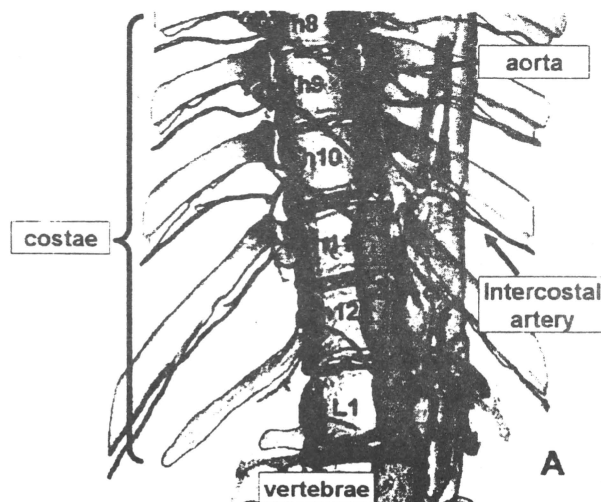


図 5. 局所画像
Fig.5 3D Image (Partial)

2.6 レジストレーション

コンピュータ画像空間の患者モデルと手術室の実空間の位置合わせを行うレジストレーションは、それぞれの座標空間で、3次元位置測定装置を用いて位置を記録していく作業をいう。大血管ナビゲーションでは指定する点としては肋骨頭や椎骨側部の突起部などの解剖学的特徴点を指定する。3次元空間の位置合わせを行うため、3箇所以上の点の登録を行う。このレジストレーションに用いる点の候補と組み合わせについては 3.2 レジストレーション点の設定で示す。

レジストレーション誤差の算出法は以下の通りである。レジストレーションには対象範囲に応じて解剖学的な特徴点を n 点選択して用いる。画像上の解剖学的特徴点の点群を iP 、ポインタを用いて実際に患者空間の特徴点を指して計測した点の点群を pP とし、レジストレーション座標変換行列が iT_p であるとき、計測点 pP を画像座標によって求められた座系の点 ${}^pP'$ に座標変換した値は式 (2.1) で示される。

$${}^pP' = {}^iT_p ({}^pP) \quad (2.1)$$

ここで、任意の特徴点を k 番目の点としたとき、画像空間上で選択した特徴点 iP_k と実際に計測した点 pP_k との誤差 Δr_k は式 (2.2) で示される。

$$\Delta r_k = |{}^pP_k - {}^iP_k| = |{}^pP_k - {}^iT_p ({}^iP_k)| \quad (2.2)$$

$k=1$ から n までの Δr_k を算出し、その平均値が最小となることをレジストレーション誤差とし、システム信頼性の評価に用いた。

システム評価のためには目標部位の位置の精度を示すことがふさわしいが、大動脈切開後に肋間動脈の開口部の位置を毎回計測することは行っていない。患者の命が優先されるべき状況下で実際の手術とは異なる作業を増やすことは倫理的に困難であるためである。

目標とする領域を囲むように骨の特徴点を設定すれば、各骨の位置の誤差範囲内に血管の位置誤差があると考えられる。そこで、目標血管の誤差の代わりに骨のレジストレーション精度をシステム評価に用いることとした。



図 6 解剖学的特徴点(大局)

Fig.6 Anatomically specific points (Global)

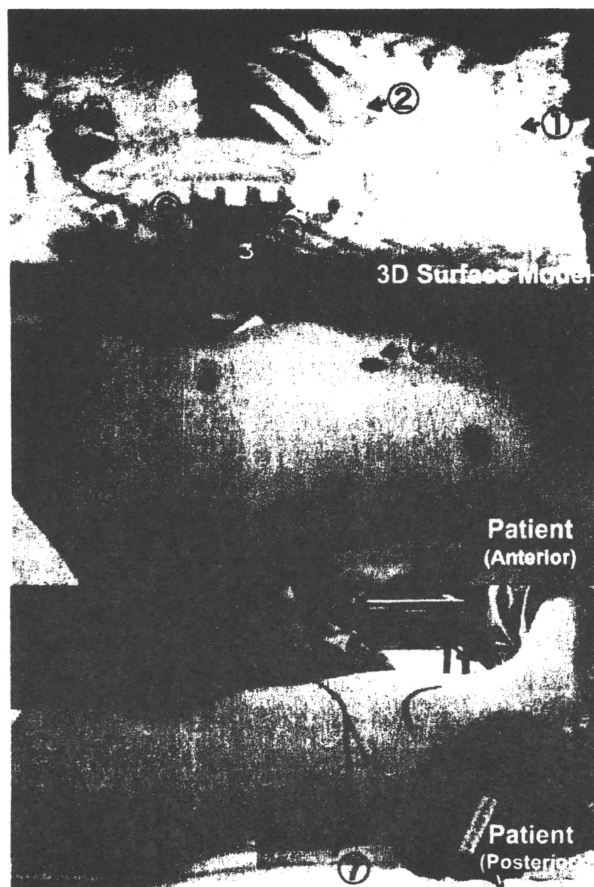


図 7 解剖学的特徴点(局所)

Fig.7 Anatomically specific points (Partial)

3 臨床応用

3.1 調査対象

2006年7月から2008年8月までに東京女子医科大学で行われた胸部下行大動脈瘤および胸腹部大動脈瘤の人工血管置換術全30例で本システムを利用した。初期の21例については、局所画像のみを用いたナビゲーションを行っていたが、開胸後に広い手術野を確保できない場合は画像で見えるように明瞭にレジストレーションの位置を特定することは難しく、限られた局所の領域を見て、手探りで特徴点を探すことになる。そこで、最近の9例については、開胸前に体表上から体内の骨や血管の立体的位置関係を把握し、作業を進めることができるよう大局画像を用いたナビゲーションを導入し、局所画像を用いたナビゲーションを併用した。

また、システムの利用者は執刀医1名(熟練医師:手術者A)と助手2名(中堅医師:手術者B,C)とした。

3.2 レジストレーション点の設定

(1) 大局画像によるナビゲーション

体軸に近く、解剖学的に頭足方向の動きが小さく、皮膚の上から触っても位置が確認できる特徴のある部位をレジストレーションに用いる。

特徴点は次の8部位を挙げた。①胸骨角、②剣状突起、③左肋骨弓、④左鎖骨頭、⑤恥骨、⑥左前腸骨棘、⑦背中(Th11)、⑧背中(Th12)。ここで、Th11、Th12の肋骨は腹側の軟骨で固定されず、開放状態にある。つまり、左肋骨弓は10番の肋骨の軟骨の下端をさす。①、②、④、⑤、⑦、⑧は身体を中心、③、⑥は身体を中心から離れた位置にある。基本的には、ターゲットとなる領域を囲むように体軸に近い3点で選択すれば誤差は小さくなる。解剖学的特徴点設定の一例として、①-③、⑤-⑦の6点を設定したときを図6に示す。

局所画像によるナビゲーション

レジストレーション点は、ターゲットとなる肋間動脈の起始部の解剖学的特徴点を3点で囲むように設定する。基本的には、ターゲットとなる肋間動脈が走行する肋骨を基準点(点①)とし、1レベル上の肋骨(点②)、さらに①と②の間の椎骨(点③)とする。これらの点の配置を図7に示す。①-③の数字は図中の数字に対応する。

これら特徴点は各症例に応じて適宜決定する。重要な肋間動脈のレベルに応じて、開胸の範囲が異なり、また、患者の病変の状態によって大動脈の走行が異なることから、手術視野が制限されるためである。

臨床経験より、骨上の点は解剖学的特徴点として利用するにも選択誤差が比較的小さかった。特に肋骨頭は医師の技量によらず認識しやすい点であった。これより、大動脈瘤の蛇行によって肋骨頭が視野から隠れてしまうときを除いて、肋骨頭を選択することとした。

4 結果および考察

4.1 大局画像によるナビゲーション

開胸前の大局画像を用いたナビゲーションの結果を表1に示す。9回行っており、胸骨角、剣状突起、左肋骨弓の3点は必ず選択しているが、他の特徴点選択のパターンによって(1)から(6)までの場合にわけられる。特徴点の選択は○×で示す。○は該当あり、×は該当なしを意味する。

ナビゲーションを施行する上で、いずれの場合も隣り合う肋骨と間違えることはなかった。特に、胸骨角と剣状突起に関しては頭足方向に最もずれが大きいときでも14.6mmであった。1本の肋骨の幅が約20mm程度であり、隣り合う肋骨との間隔もさらに約10mmあることから、肋間レベルを特定できた。

胸骨角が第2肋骨の起始部、剣状突起が第7番肋骨の起始部にあたり、左肋骨弓が第10番肋骨の下端にあたるので、ターゲットがその範囲に含まれる場合は胸骨角、剣状突起、左肋骨弓この3点によるレジストレーションでも十分ナビゲーションが可能であった。

表1 レジストレーション誤差(大局)

Table 1 Registration Errors (Global)

		特徴点選択のパターン					
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
特徴点の部位	① 胸骨角	○	○	○	○	○	○
	② 剣状突起	○	○	○	○	○	○
	③ 左肋骨弓	○	○	○	○	○	○
	④ 左鎖骨頭	×	○	○	×	×	×
	⑤ 恥骨	×	×	○	○	×	×
	⑥ 左前腸骨棘	×	×	×	○	○	○
	⑦ 背中 (Th12)	×	×	×	○	○	×
	⑧ 背中 (Th11)	×	×	×	×	○	×
誤差 [mm]	1回目	11.5	10.8	8.4	24.1	25.8	25.8
	2回目	13.3		11.7			
	3回目	16.5					

さらに、体軸方向の点である左鎖骨頭、恥骨を加えると、全体の誤差が減少したが、頭足方向の誤差を軽減できたためと考えられる。一方で、左前腸骨棘、背中の特徴点についても利用した。左前腸骨棘は背腹方向に誤差が大きかった。これは、患者の体位が画像撮影時の仰臥位から手術中に側臥位になることで捻転の影響を受けること、腸骨上の脂肪が重力方向に移動したことによると考えられる。また、背中の点については、体軸方向に近く、ターゲットとなる領域を囲む上でも適当な場所であると考えられるが、誤差は増大した。これは、画像取得時と手術中に同じ位置を選択することが難しかったためと考えられる。

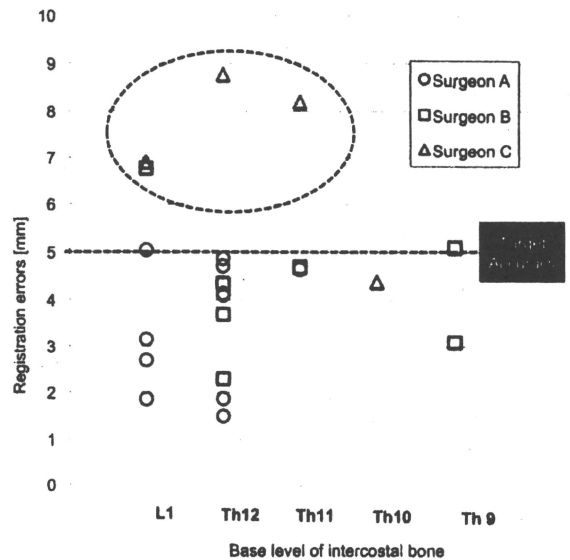


図8 基準点に対するレジストレーション誤差(局所)

Fig.8 Registration Errors (Partial) in relation to a base point

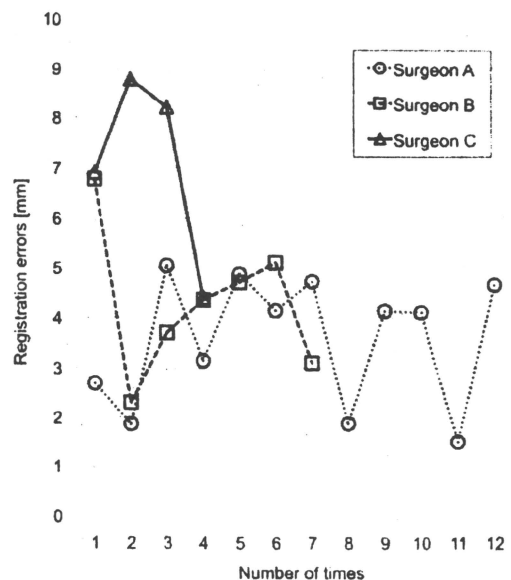


図9 施行の順番に対するレジストレーション誤差(局所)

Fig.9 Registration Errors (Partial) in relation to number order

4.2 局所画像によるナビゲーション

ここでは局所画像を用いてナビゲーションを行った30例のうち、基準となる肋骨頭(①)と基準より1肋間上のレベルの肋骨頭(②)、①と②の間になる椎骨上の点(③)の3点でレジストレーションを行ったとき23例の結果について述べる。これらの点を選択できない場合の誤差については、文献[2]を参照されたい。

23例の症例の内訳は手術者Aが12例、手術者Bが7例、手術者Cが4例であった。図8に基準点を横軸にとったときのレジストレーション誤差について、3人の手術者を比較した結果を示す。基準とした肋骨頭を横軸とし、縦軸にレジストレーション誤差を示した。グラフを見ると、19例で目標精度とした5.0mm以下となっており、精度は安定している。肋骨間が1肋間であれば、身体の捻転の影響も受けにくく、背骨のレベルによらず誤差はほぼ一定となったと考えられる。

また、図9に施行の順番を横軸にしたときのレジストレーション誤差について、3人の手術者の比較した結果を示す。手術者Aに関しては、全例で5.0mm以下のレジストレーション誤差となっており、2.0mm以下に抑えている場合もある。手術者B、Cについては最初のうちは7.0-9.0mmの誤差となっているが、回数を重ねることで誤差が減少する傾向にある。大動脈瘤の走行によっては探索が難しいところを手探りで探索することになるため、手術者にある程度の解剖学的なイメージがなければ難しい作業であることが示唆された。

4.3 外科医のコメントと手術成績

画像を用いたナビゲーションによって、立体的な画像を用いて、患者の重要な肋間動脈の位置を特定し、走行を把握することができるようになったことは、次の2点を可能にしたとのコメントを得た。1) 執刀医がこれまで経験と勘をもとに下していた決断に客観的な情報を加えることができるようになった。2) 執刀医の頭の中だけにあったイメージを画像によって助手との情報共有できるようになった。これより、執刀医も自信を持って自分の判断が下せるようになった。

さらに、本システムを利用した30例の臨床例では、院内での死亡が1例あったが、対麻痺の発生はゼロであった。現在、東京女子医科大学で行われる胸腹部大動脈瘤の手術では、必ずナビゲーションを利用している。そして、手術における外科医の安心と患者のQOL向上させるためのツールのひとつとなっている。

5 今後の展望

今後、このシステムが他の医療機関でも利用されるようになるためには次の3点の問題を克服すべきである。すなわち、1) レジストレーション方法の簡易化、2) ベッドの移動による再レジストレーション、3) 作業効率の向上

である。

1) レジストレーション方法の簡易化については、4.2で示したようにレジストレーション点として解剖学的特徴点を正確に選択すること自体にスキルを要することがわかった。オリエンテーションがつけられない場合には、肋骨そのもののレベルを間違ふこともあり得た。そこで、解剖学的特徴点を簡単に探し出すために、大局画像を取り入れたナビゲーションを行っており、肋骨のレベルを同定するには十分の精度であった。大局画像では大動脈の走行までは確認できて肋間動脈の走行までは描出できない。そこで現在、大局画像と局所画像を融合させて、開胸前にレジストレーションした結果をそのまま用いたナビゲーションへの改良を行っており、画像の補正アルゴリズムについても検討をしている[9]。

2) ベッドの移動による再レジストレーションについては、開胸前に行ったレジストレーションを開胸後も利用したい場合には考慮しなければならない問題となる。レジストレーションした結果を利用するためには、3次元位置測定装置と患者の相対位置が動かないことが前提となる。しかし、通常臨床では手術野を確保するために患者のベッドを動かす機会が多い。患者と計測器の位置関係がずれた場合には、再レジストレーションをすれば、ナビゲーションを再開できるが、レジストレーションの時間がかかるため、ベッドの動きを追跡し、補正する機能も追加した[10]。

3) ナビゲーション施行において、最も労力がかかるのがセグメンテーションの作業である。CTの画像から3Dサーフェスデータを作成する工程には、膨大なデータから大血管と分枝・骨を精密に抽出する作業が必要である。多くを人力に頼る作業であり、現在手術前には1日がかりで準備をしている。画像データから半自動的に血管・骨を抽出するために、予め骨や血管の構造をテンプレートとして読み込み、画素値と同時に解剖学的構造を考慮した領域抽出を行う方法を確立したい。

6 まとめ

本論文では、30例の大動脈瘤手術に対して手術ナビゲーションを利用し、システムの有用性を論じた。そこで、以下の3点を満たすことを確認した。1) ナビゲーションを用いて、重要な肋間動脈の位置を臨床上十分な精度で特定できた。2) 手術中に患者の体内で見えない血管の走行もCT画像から血管・骨などのCGモデルを作成して呈示することで容易に把握できた。3) 手術後の対麻痺の発生率がゼロであった。

また、医師の熟練度によって、局所画像を用いたのみのレジストレーションは特徴点探索が難しいことがあるとわかった。そこで新しい試みとして、大局画像を用いたナビゲーションで予め解剖学的イメージを把握した上で、局所画像を用いたナビゲーションを施行するシステ

ムへと改良した。

今後は、これまでの成果を活かし、大局画像のレジストレーションのみでナビゲーションが行えるよう、発展させていきたい。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金 20700414 および平成 20 年度厚生労働科学研究費補助金(循環器系 DRY ラボセンターの創設と ENGINEERING BASED MEDICINE の推進)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] BrainLAB: <http://www.brainlab.com>
- [2] Stealth Station: <http://www.medtronicnavigation.com/>
- [3] Ueda Y, Osada H, Osugi H.: Thoracic and cardiovascular surgery in Japan during 2005; Gen Thorac Cardiovasc Surg, 55(9), 377-399, 2007
- [4] 2004-2005 年度合同研究班報告: 大動脈瘤・大動脈解離診療ガイドライン(2006 年度改訂版); Circulation Journal, 70(Supplement VI), 1647-1677 (2006 年 11 月)
- [5] 長嶋義昭, 廣瀬佐智雄, 鈴川浩一, 苗村潔, 高信英明, 村垣善浩, 伊関洋, 梅津光生, 高倉公朋: OpenMRI 下脳外科手術におけるナビゲーションシステムの精度および操作性向上に関する研究, 日本コンピュータ外科学会誌, 6(1):5-12, 2004
- [6] 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, 8(4):417-424, 2007
- [7] Takase K, Sawamura Y, Igarashi K, Chiba Y, Haga K, Saito H, Takahashi S.: Demonstration of the artery of Adamkiewicz at multi-detector row helical CT; Radiology, 223(1), 39-45, 2002
- [8] Yoshioka K, Niinuma H, Ohira A, Nasu K, Kawakami T, Sasaki M, Kawazoe K.: MR angiography and CT angiography of the artery of Adamkiewicz: noninvasive preoperative assessment of thoracoabdominal aortic aneurysm; Radiographics, 23(5): 1215-25, 2003
- [9] 松川紘大, 植松美幸, 中野善隆, 宇都宮隆平, 青見茂之, 飯村浩, 中村亮一, 村垣善浩, 伊関洋, 梅津光生: 胸部領域ナビゲーションにおける術中体位の変化を考慮した骨格変形補正法, 日本コンピュータ外科学会誌, 10(3): 395-396, 2008
- [10] 中野喜隆, 植松美幸, 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: 大血管ナビゲーションにおけるベッドの動きを補償するマーカシステムの開発, 日本コンピュータ外科学会誌, 10(3):333-334, 2008

(2008 年 9 月 22 日)

[著者紹介]

植松 美幸(非会員)



2002 年早稲田大学理工学部卒, 2007 年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。博士(工学)。2005 年同大学理工学研究科客員研究助手, 2006 年日本学術振興会特別研究員, 2007 年早稲田大学人間科学学術院助手。2007 年 12 月国立医薬品食品衛生研究所研究員, 現在に至る。手術支援工学(ナビゲーション, 計測システム), 医療機器のレギュラトリーサイエンス, リスクアセスメントの研究に従事。

中野 喜隆(非会員)



2008 年早稲田大学理工学部卒, 2009 年現在, 同大学大学院理工学研究科在学中。手術室内計測環境構築と精度向上の研究に従事。

松川 紘大(非会員)



2007 年早稲田大学理工学部卒, 2009 年同大学大学院理工学研究科卒業見込。手術中の体位に合わせた医療画像の変形シミュレーション研究に従事。

宇都宮 隆平(非会員)



2009 年早稲田大学理工学部卒業見込。手術ナビゲーションにおけるレジストレーションの研究に従事。

中村 亮一(非会員)



1998 年東京大学工学部卒。2003 年同大学大学院工学系研究科博士課程修了, 博士(工学)。2001 年ハーバード大学ブリガムアンドウィメンズ病院放射線科研究員。2003 年東京女子医科大学先端生命医科学研究所助手, 2007 年より助教。2008 年 12 月千葉大学大学院工学研究科特任准教授。医用メカトロニクス, 手術ナビゲーション, 医療情報システム等コンピュータ外科システム研究に従事。

村垣 善浩(非会員)



1986 年神戸大学医学部卒, 同年東京女子医科大学脳神経センター脳神経外科入局, 医師免許取得。1988 年助手, 1999 年医局長。2001 年同大学大学院

先端生命医科学研究所先端工学外科分野助手，2006年同大学大学院同分野講師，同大学脳神経センター脳神経外科，現在に至る．オープンMRIを用いた脳腫瘍完全摘出システム，情報誘導手術と手術戦略デスク，超電導磁石による磁気誘導DDSシステム，疾患動物の治療的実験による治療機器の有効性・安全性評価手法の研究に従事している．

伊関 洋(正会員)



1974年東京大学医学部医学科卒業．同年，東京女子医科大学脳神経センター脳神経外科医局入局．1976年同助手．1991年同講師．2001年東京女子医科大学先端生命医科学研究所（大学院医学研究科先端生命医科学系専攻先端工学外科学分野）助教授（脳神経外科兼任）．2006年同教授（脳神経外科兼任），現在に至る．診断即治療，切らない外科（光線力学療法，音響化学療法），精密手術，手術戦略デスク，インテリジェント手術室など，外科医の新しい手・目・脳というコンセプトで医工連携の基に産学協同で医療の現場に根ざした研究開発をスピード重視で行っている．

青見 茂之(非会員)



1981年山口大学医学部卒，同年東京女子医科大学心研外科入局，医師免許取得．1987年同大学循環器外科助手，1988年済生会前橋病院循環器外科医長，1990年東京女子医科大学循環器助手，1996年同大学循環器外科講師，2003年同大学心臓血管外科准教授，現在に至る．

梅津 光生(非会員)



1979年早稲田大学院博士課程修了．工学博士．同年，国立循環器病センター研究所初代研究員．1985年同研究室長（人工臓器部），1988年シドニー・ピント病院工学部長（初代オーストラリア人工心臓プロジェクトリーダー），1992年早稲田大学教授，1993年ニューサウスウェールズ大学（シドニー）客員教授併任，2000年早稲田大学人間総合研究センター副所長，2001年早稲田大学大学院生命理工学専攻初代主任，2006年スーパーCOE：先端科学と健康医療の融合研究機構・事務局次長，2008年早稲田大学理工学術院創造理工学部総合機械工学科教授，早稲田大学理工学術院先進理工学研究科生命理工学専攻主任，早稲田大学先端生命医科学センター長，現在に至る．

胸腹部手術ナビゲーションのための重み付き特徴点レジストレーション

Registration using weighted feature points for a surgical navigation in thoracoabdominal surgery

○中野 喜隆 (早大院生命理工) 植松 美幸 (国立医薬品食品衛生研究所)
鈴木 孝司 (東京女子医大先端生命研) 中村 亮一 (千葉大院人工システム科学)
青見 茂之 (東京女子医大心臓血管外科) 伊関 洋 (東京女子医大先端生命研)

正 梅津 光生 (早大生命理工)

Yoshitaka NAKANO, Mitsuo UMEZU, Waseda Univ., 03C202 2-2 Wakamatu-tyo, Shinjuku-ku, Tokyo

Miyuki UEMATSU, Natl Inst. of Health Sciences, 1-18-1 Kamiyoga, Setagaya-ku Tokyo

Takashi SUZUKI, Shigeyuki AOMI, Hiroshi ISEKI, Tokyo Women's Medical Univ., 8-1, Kawata-tyo, Shinjuku-ku, Tokyo

Ryoichi NAKAMURA, Chiba Univ., 1-33 Yayoityo, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba

Key words: Navigation, Registration, Model Experiments

はじめに

正確な手術ナビゲーションには、画像空間と手術空間の精度よい位置合わせが求められる。胸腹部手術では、位置合わせ用マーカの配置ができないため、手術者が選択した解剖学的特徴点を基準にレジストレーション(位置合わせ)する。現在臨床応用中のシステムは、体内の特徴点を利用するため、特徴点の探索に労力を要する。そこで、体表上の特徴点を利用し、各特徴点の特性に応じて誤差を補正するレジストレーションを提案する。今回、各特徴点の特性を調査したので報告する。

2. 方法

レジストレーションは解剖学的に特徴のある形状をもつ骨上の点について、術前のCT画像上で計測した点と術中に3次元位置計測装置で計測した点とを一致させることにより行う。この際、生じる誤差は主に次の3つの要因:1)形状, 2)皮下組織厚, 3)CT画像(撮影体位等)による。そのうち, 1), 2)は、特徴点周りの構造に由来するため、人体模型(Fig.1)を用いて、誤差を推定する。

人体模型は骨格モデル(3D Scientific, Inc.)と皮下組織を模擬した2種のシート:A)シリコン, B)ソルボセイン(Sorbothane, Inc.)により構成される。解剖学的特徴点は臨床経験より次の3点:a)恥骨稜, b)腸骨突起, c)胸骨角とし、それぞれ、シート厚は点a(0mm, 10mm, 20mm, 30mm), 点b(0mm, 1mm, 5mm, 10mm, 15mm), 点c(0mm, 3mm, 6mm, 9mm)とした。これらのモデル上の特徴点を被験者が指し示した時の位置を計測し、特徴点形状、皮下組織厚の変化に伴う計測値の平均と分散を算出する。

ここで、シート厚と実際のヒトの皮下組織厚との対応をとるため、ヒトの皮下組織の平均厚(点a:33.7mm, 点b:11.8mm, 点c:6.6mm)と比較する。

3. 結果と考察

頭足方向に着目した結果を Fig.2 に示す。縦軸は誤差値、横軸はシート厚をヒトの皮下組織厚で割った無次元量である。つまり、横軸の1という値はシート厚とヒトの皮下組織の平均厚とが一致することを示す。胸骨角の平均誤差および分散が頭足方向5mm以下であった。恥骨稜は平均誤差が5mm以下であったが、分散が10mmを越えることもあった。腸骨突起は平均値、分散値共に大きく、組織厚が厚いと10mmを超える誤差も計測された。

本システムでは頭足方向について精度10mmを目標としているため、レジストレーション誤差は5mm以下が望ましい。これより、胸骨角は信頼性の高い解剖学的特徴点と考えられる。一方、腸骨突起はもっとも分散が大きい点であり、被験者の選択の仕方によって変動する可能性が高い。

4. まとめと今後の展望

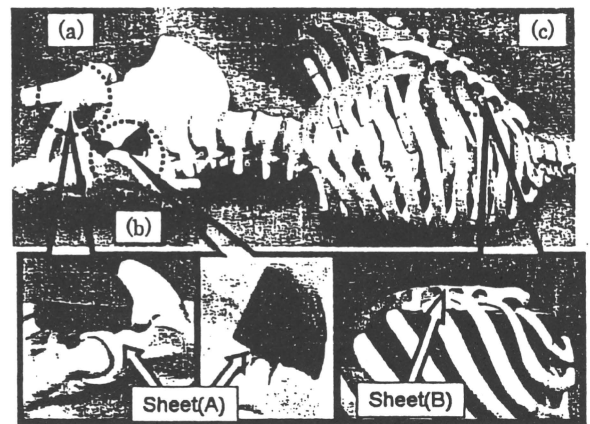
体表上からレジストレーション点を計測した際の特徴点ごとの信頼性を調査した。胸骨角は信頼性の高い点であった一方で、腸骨角は計測者によってばらつきが大きい点であった。

レジストレーション点として利用できる解剖学的特徴点は限られているため、信頼性の高い点と低い点を混合して用いること

になる。解剖学的特徴点ごとに信頼性を考慮した重み付けをすることがよりレジストレーションの精度を向上させると考える。

謝辞

本研究は科研費(20700414)の助成を受けたものである。



(a)Public crest (b) Anterior superior iliac spine (c)Sternal angle

Fig.1 Anatomically specific points (model)

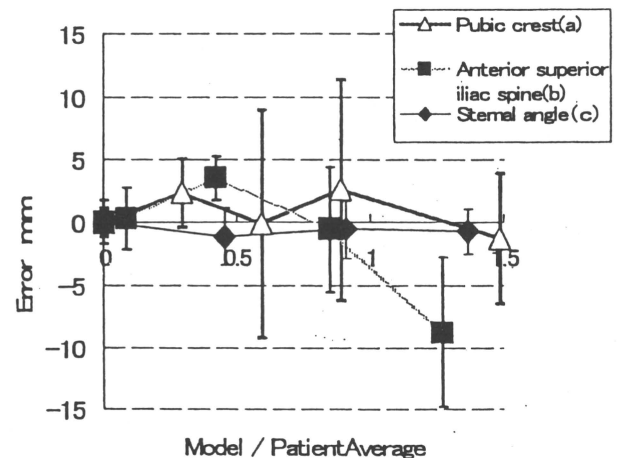


Fig.2 Errors corresponding to thickness of tissues (n=35)

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～

国立医薬品食品衛生研究所 薬品部 植松美幸

MIRACULAR JOURNAL

1 はじめに

現在、私たちはGoogle Earth¹⁾を使って、地球上の様々な場所を空から地上からありとあらゆる角度で眺めることができる。それは私たちが幼い頃に地球儀を使ってぐるぐる回しながらいろいろな国を探したのとはまた違う感覚である。例えて言うなら、スモールライト^{*1}を使って、自分自身の大きさを大きくしたり、小さくしたりして、いろいろな土地を訪れたような感覚である。このように今はコンピュータを使えば、全地球規模の情報も自由に操作できる時代になったのだと考えていいのかもしれない。

実はこれに似た技術はGoogle Earthが出るずっと前から医療の世界にも応用されている²⁾。

この場合、上記例の地球に当たるのがヒトの身体である。地球の場合は、宇宙を周回する衛星から、あるいは道路情報を走る車から、計測した地球の画像と位置情報をもとに立体的に再構築したデータの集まりを扱っている。一方、医療では、X線CTやMRIといった画像診断機器によって撮影され、デジタル化された画像情報を用いる。

この画像データは3次元的な広がりをもつ情報の集まりで、血管や骨・臓器の構造を精密に表現可能である。本来なら身体を切開した後に見える世界が、身体に一切メスを入れることなく取得される。この情報は多くの場合、病状を診断するために用いられる。しかし、そればかりでなく、患者の身体を3次元的に表現する画像情報を手術中に医師の理解を助ける地図とし

*1 ドラえもんが4次元ポケットから出すひみつ道具の1つ。懐中電灯のような形をしている。スイッチを押して光を出し、物体に当てると、物体が小さくなる。

て用いることもできる。治療しようとする目的の血管や腫瘍の位置をこの地図によって医師が把握するのである。これを可能にするシステムを手術ナビゲーションシステムという。本稿では、手術ナビゲーションシステムの大血管外科領域への応用の取り組みについて紹介する。

2 手術リスクの高い大血管外科手術

大血管とは、心臓の左心室から全身に血液を送る重要な血管、大動脈をいう。身体のほぼ中心を頭から足の方向に走る。大動脈の壁が薄くなり、膨れたものを大動脈瘤という。瘤が破裂すると、死に至る危険性が高い。そのため破裂を未然に防ぐよう、人工血管に置換する手術が行われる。国内における胸部大動脈瘤の手術は2005(平成17)年に8,907件行われており、うち1割がステント治療である³⁾。大動脈の人工血管置換術における手術リスクは低下したとはいえ、死亡率が7~11%あり、手術合併症の下半身麻痺の発生率は2~27%ある⁴⁾。そこで、手術リスクを回避するための方法が諸施設で検討されている。

下半身麻痺の原因は、人工血管への置換後に脊髄へ血液が十分に送られないためだと言われている。予防法の1つに、脊髄への多くの血流

図1(a)

どれが大事な血管かな？

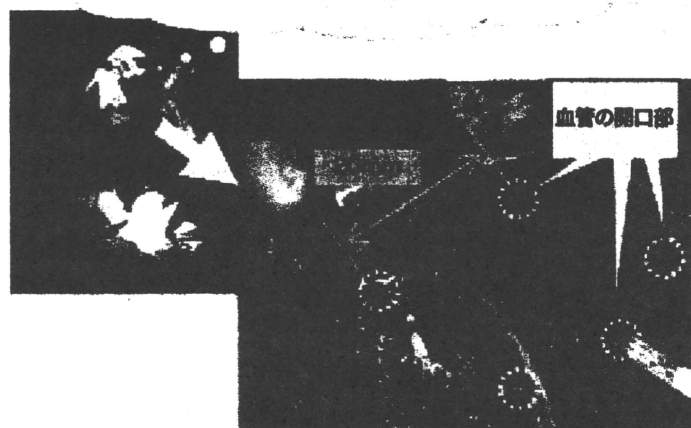


図1(b)

あっ！この血管だ！！



を確保している^{ろっかん}肋間動脈のみを手術中に同定して温存し、人工血管置換後にも十分な血流を確保することが有効であるとの考えがある。しかし、大動脈から分岐する肋間・肋下動脈は10対あり、大動脈切開後に内壁側から見えるそれら動脈の開口部は、図1(a)に示すように5本程度ある。その中から脊髄につながる重要な1本の肋間動脈の開口部を同定し、血管壁の裏側にある肋間動脈の走行を把握する作業は手術者

の経験と技術に大きく依存する。

ここで求められる技術は手術前に頭の中に思い描いた立体像と実際に目の前に広がる患者体内の解剖学的情報とが正確に一致することである。図1(b)に示すように、手術者は患者の予後を左右する1本の血管の位置を決定する。しかし、限られた時間の中で行わなければならない、手術者にとって大きな精神的負担となる。

3 大血管手術ナビゲーション

われわれは、大血管手術ナビゲーションシステムを開発した⁵⁾。このシステムは、手術前の画像を地図としてモニタ画面に表示し、温存す

る肋間動脈の位置・走行を即座に把握するためのものである。医師が手に持っている術具の位置を画面上に同時に指し示すことで、目標との位置関係を確認できる。

本システムでは、地図となる画像に、患者体内の情報として手術前の3次元CTの画像を使用する。図2に示すように詳細な情報を確認するために3方向から見た断層画像を表示するほか、事前に血管や骨を部位ごとに分け、輪郭を抽出して3次元再構築したモデルを使用する。3次元モデルは、色・透明度に関して可変で見たい部位を見たい方向から自由に見ることができる。これにより、術者が術中に、いつでも容易に術野の空間的な位置関係を把握することができる。

図2



4 システムの臨床応用

2006(平成18)年7月から2008(平成20)年8月までに東京女子医科大学で行われた胸部下行大動脈瘤および胸腹部大動脈瘤の人工血管置換術全30例で本システムを利用した。いずれも、手術中に重要な血管の位置を同定するのに役立っており、安心して手術ができると医師からコメントをもらっている。

技術的な側面からいうと、ナビゲーションを行うには患者の画像と実際の患者の解剖学的情報とが一致することが重要である。画像を手術前に撮影することから、手術中の患者の体位とは異なっており、完全に一致させることは難しい。そこで、初期の21例については、動きの小さい部位を精度よく合わせることでナビゲーションを行っていた。しかし、開胸後に広い手術野を確保できない場合は画像で見えるように明瞭にレジストレーションの位置を特定することは難しく、限られた局所の領域を見て、手探りで特徴点を探すことになった。そこで、最近の9例については、開胸前に体表上から体内の骨や血管の立体的位置関係を把握し、作業を進めることができるよう画像全体を用いたナビゲーションを導入している⁶⁾。

5 おわりに

手術は低侵襲化の方向に進んでおり、なるべく切らずに治す傾向にある。今回紹介したような開胸を伴う手技は、未来の医療においては少なくなるに違いない。しかし、ステントやコイルを用いた治療、エネルギー照射することによ

る療法にしても、ある目的に対してどのようにアプローチするのかというプロセスは重要である。またさらに、実際に身体を開けて見ることができずに治療するからこそ、目的とする治療域へのナビゲーションという技術は重要な治療支援技術となるであろう。画像の情報も事前に撮影したものだけでなく、リアルタイムに取得したデータを融合させた情報を用いるようになるであろう。そのためには、実際の身体とコンピュータ上の画像データとの正確かつ迅速な位置合わせが求められる。

6 謝辞

本研究を行うにあたり、分野の垣根を超えて多くの先生のご指導、ご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

梅津光生先生、松川紘大氏、中野喜隆氏、宇都宮隆平氏(早大理工)、中村亮一先生(千葉大工)、青見茂之先生、斎藤聡先生、富岡秀行先生(東京女子医大心臓血管外科)、飯村浩氏(同大放射線科)、伊関洋先生、村垣善浩先生(同大先端生命研先端工学外科)、他関係各位。

参考文献

- 1) Google Earth: <http://earth.google.co.jp/>
- 2) Visible Human Project: http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html
- 3) Ueda Y, Osada H, Osugi H. : Thoracic and cardiovascular surgery in Japan during 2005; Gen Thorac Cardiovasc Surg, 55 (9), 377-399, 2007
- 4) 2004-2005年度合同研究班報告:大動脈瘤・大動脈解離診療ガイドライン(2006年度改訂版); Circulation Journal, 70 (Supplement VI), 1647-1677 (2006年11月)
- 5) 植松美幸、青見茂之、鈴木浩一、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, 8 (4):417-424,2007
- 6) 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, 14 (1), 2009 (印刷中)