

大腿膝窩動脈バイパスの末梢吻合部におけるカフ付き吻合の image based computational fluid dynamics

三岡 博¹ 北村 史郎² 桑原 邦郎³ 海野 直樹⁴

要 旨 : 【背景】末梢吻合のフローパターンはその三次元形状によって影響をうける。大腿膝窩動脈バイパスの末梢吻合部におけるカフ付き吻合の流体力学的な効果をコンピュータ流体力学(CFD)で評価した。【方法】カフ付き吻合を作製し、その三次元形状を3D digital subtraction angiography(DSA)で調査した。カフ付き吻合にはDistaflo(Bard Peripheral VascularTM, Tempe, Phoenix)を使用した。吻合部床の血管病変の個体差などの影響を少なくするために、標準型吻合は、同一な吻合面が全く等しくなるものと仮定して、仮想標準型吻合を作製し、比較のために使用した。両者とも末梢での血流の分配比は足側:頭側=100:0と仮定した。CFDで得られる血流波形とシネアンギオグラフィーでの血流波形を解析した。【結果】計算された流速ベクトルはシネアンギオグラフィーで可視化された血流とほぼ同一であった。カフ付き吻合は生体血管床の壁ずり応力を増加させた。【結論】3D DSAを使用したCFD分析は症例特有の局所の流体力学を再現しうるものと考えられた。(日血外会誌 15 : 415-420, 2006)

索引用語: 血管造影, 末梢吻合部, 血行動態, コンピューターシミュレーション, 剪断応力

はじめに

末梢吻合部内の流体力学的要素は吻合部内膜肥厚に関連する重要な因子である¹⁻⁴⁾。カフ付き末梢吻合は、吻合部内の流れのパターンと血液のよどみを改善させて、バイパスの予後を改善する可能性がある⁵⁻⁸⁾。しかしながら、たとえ同じ三次元形態を有する場合であっても、症例特有の流体力学的要素に差があれば、カフ付き吻合を使用することによって得られる効果は一様でない可能性がある⁹⁾。この事象を従来の臨床医学的な方法論で調査しようとする場合、症例数の蓄積やその

効果の判定に多大な年月を必要とする場合が多い。一方、最近の医療画像技術の発展にはめざましいものがあり、それらを応用したimage based computational fluid dynamics(IBCFD)は、コンピューターシミュレーション技術を応用した方法論で事象を解析できる可能性がある。3D DSAをもちいて大腿-膝窩動脈バイパス(FPB)の末梢吻合部の三次元形態を計測し、局所のフローパターンをIBCFD技術によってシミュレーションすることにより、血流波形の差がカフ付き吻合の効果にもたらす変化について考察したので報告する。

材料と方法

末梢吻合部は膝関節上の膝窩動脈で、カフ付き吻合は predesigned cuffed graft(Distaflo, Bard Peripheral VascularTM, Tempe, AZ)で作製した。標準型の末梢吻合部の計算に利用する三次元鋳型には、同じ生体血管に同じ吻合口で標準型吻合を作製した場合にとりうる形状の三次元形態をvirtual空間で作製し、これを利用した(Fig. 1)。本研究で使用されたCFDの詳細は既存の報告を参照さ

1 静岡赤十字病院心臓血管外科(Tel: 054-254-4311)
〒420-0853 静岡県静岡市葵区追手町 8-2

2 計算流体力学研究所

3 宇宙研究開発機構

4 浜松医科大学第二外科血管外科

受付: 2005年9月15日

受理: 2006年2月27日

第33回日本血管外科学会総会 座長推薦演題

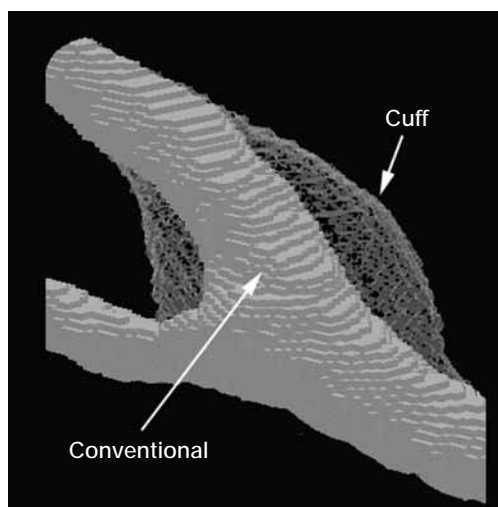


Fig. 1 Two types of distal side-to-end anastomoses. A virtual conventional anastomosis (dark grey) and a cuffed type anastomosis from a real case were used in the present study.

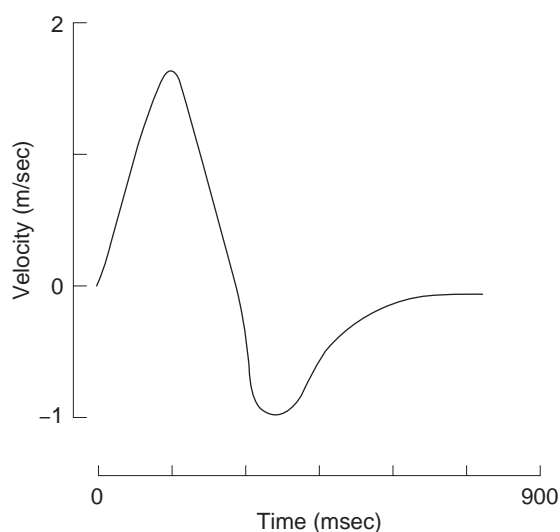


Fig. 2 Input blood flow velocity patterns. A bi-phasic input blood flow velocity patterns used for computational fluid dynamics analysis.

れたく¹⁰⁾、ここでは簡略に述べるのみとする。CFDには Navier-Stokes方程式、連続の式、およびポアソン方程式を使用した。血液は非圧縮性の一様なニュートン流体で $3.127 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{sec}$ の粘性をもち、血管壁の伸縮はほとんどないものと仮定した。血流波形には本患者において術後の超音波画像診断で得られた入力波形を参考にしたものを利用した(Fig. 2)。末梢吻合部においては、足側と頭側の流出路への血流分配比は100:0であるとした。術後造影と術後のduplex scanにおいて、実際の標準型吻合とカフ付き吻合の患者のうち、血液流入波形が単相性で最大速度がほぼ等しく、また頭側吻合部の体積がほぼ同等で、足側と頭側の流出路への血流分配比は100:0である症例を各群から抽出し、吻合部より約10cm上から2mlの造影剤を注入し、吻合部の頭側流出路における造影度を比較することによって、同部における血液の鬱滞をvideodensitometry法により比較した¹¹⁾。

結 果

1) フローパターン分析

標準型吻合部内では層流が認められたが、流れの剥離(頭側と足側流出口への流れの分離)は吻合部の生体血管床における踵部に近いところで認められ、踵側への流線成分は小さかった。一方、カフ付き吻合部内では

は、規則的な流線を描く渦が観察され、頭側流出路にむかう流線が発生していた(Fig. 3)。一方、実際の患者におけるcine-angiography(Fig. 4)はIBCFDによって計算された流速ベクトルの流れとほぼ同様であった。

2) 生体血管床における壁剪断応力(wall shear stress) 標準型吻合の生体血管床の踵部におけるwall shear stress(WSS)の振幅が小さいことが観察された。一方、カフ付き吻合は、この部位におけるWSSの振幅を増大させることが観察された(Fig. 5)。

3) 実際の患者における血液のよどみの比較

標準型吻合の患者の末梢吻合部では、頭側の流出路のgrey scaleは数拍分の血流が流入していた後も注入前のレベルに回復せず、血液がこの部位に鬱滞しやすいことが想像された。これに対し、カフ付き吻合の患者ではこの間に造影剤注入前と同じレベルまでgrey scaleが回復していた(Fig. 6)。

考 察

CFDは局所における流体力学的要因と生物学的事象の関連について理解を深めるために、さまざまな研究に使用されている¹²⁾。医療三次元画像技術の発達はCFD分析にさまざまな利点があると考えられる。一つの利点は、現在における医療三次元画像装置は小さなボクセルサイズ(3D DSAの場合は $0.125 \sim 0.25 \text{mm}^3$)で画像デー

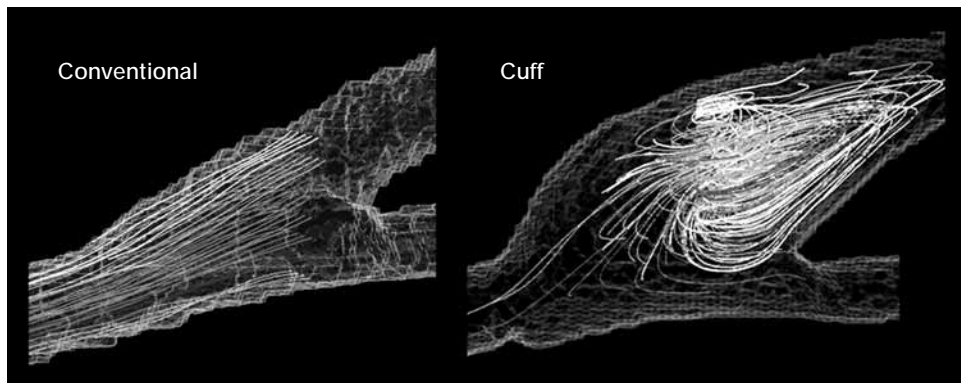


Fig. 3 Streamlines in the late systole were presented. Note the differences of streamlines between the two. In the conventional form of anastomosis, the lines apply the lower shear than in the cuffed type anastomosis.

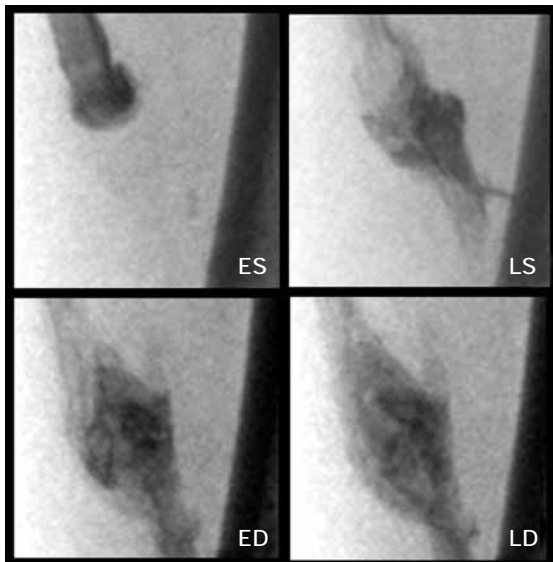


Fig. 4 Cine-angiography. ES and LS indicate early or late systole, while ED and LD early and late diastole.

タを作製するために、CFDにおいてそのデータを容易に利用できることである。3D DSAをCFDに利用することの利点は、DSA自体の画像特性である、血管壁の石灰化の影響をうけることなく血管内腔を正確に計測できることが一つの利点であるだけでなく、同時に圧測定やcine-angiographyも施行可能であることなどから、CFDに必要なさまざまな血行動態を把握しやすいのみでなく、実際に計算された結果を実情と比較しやすいことであると思われる。また、本研究では、吻合部の心周期内での変形が無視しうる程度であるため、形

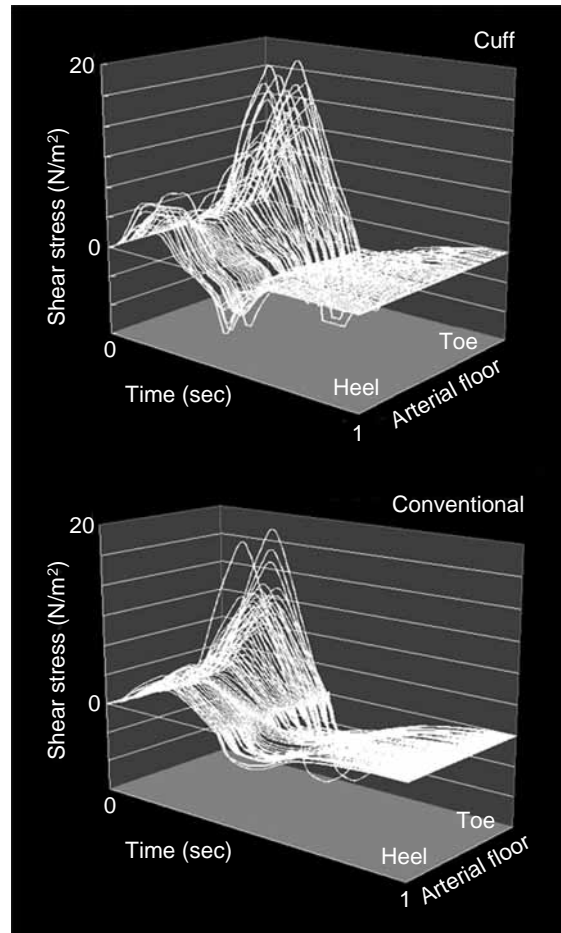


Fig. 5 Wall shear stress along the center line of arterial floor. X axis indicates time, Z axis locations along the centerline of the recipient artery floor, and Y axis wall shear stress. Note the difference in the amplitude of wall shear stress profiles at the heel of anastomosis.

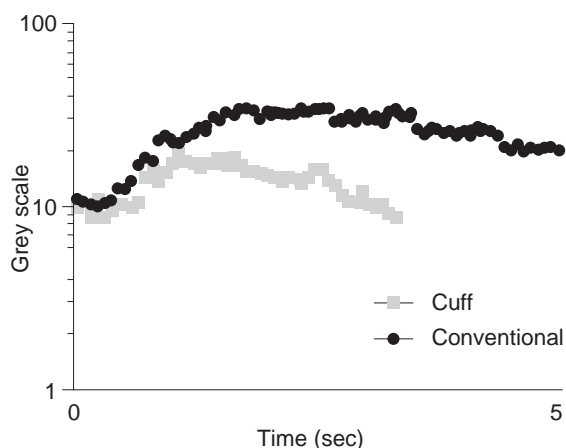


Fig. 6 Flow stagnant in caudal outlet. Contrast agent became stacked in the cranial outlet, while the dye was completely wiped out in less than 5 heartbeats after the injection.

状が一様であるものと仮定してシミュレーションを行った。もしも、心周期内における三次元形態の変化が大きい生体内構造内での流体のシミュレーションを行う場合には、心周期に同調させたmulti-detector CTなどが有用になるものと考えられる。

カフ付き吻合部内の渦はWSSを変化させ、WSSの適度な上昇は内膜肥厚の抑制に関連するものと考えられている¹⁾。吻合部における三次元形態の差は局所の流体力学的要因の違いをもたらす。例えば、末梢吻合部の動脈径が異なれば、同じ形態のカフを使用したとしても吻合部の三次元形態には個体差を生じ、それは渦の持続時間やその流線の領域の大きさに違いがでるものと考えられる。そのような幾何学上の個体差に加えて、入力血流波形の差があり、それによってもカフの効果には差が生じるものと考えられる。われわれの経験においては、本研究のようなFPBにおける末梢吻合部のサイズは血管内腔が6mm程度であった。また、血流分配比は足側が極端に高い症例が多かったが、これはFPBにおいてはできるだけ膝関節の上に末梢吻合部を作製したほうがよいという血管外科的な発想がその根幹にある可能性がある。したがって、このような状況下(足側への分配比が高いFPB)ではカフ付き吻合のほうが有利であると考えられる。

血液の鬱滞は、血管壁のみならず血液成分にもさまざまな変化を惹起することが最近明らかになってきた。内皮細胞のprostaglandinなどの産生はその内腔側への

WSSによって刺激されていることが報告されている¹³⁾。白血球は血流がない状態で活性化されて偽足形成を引き起こし、その活性化は血栓形成性に働く蛋白分解酵素を発生させる^{14,15)}。このように、血管壁のみならず血液細胞の性質を変化させることによって、血液の停滞は血栓形成を促すものと考えられるため、吻合部内にはたとえ局所といえども血液の停滞が発生することは決して良い影響をもたらさないものと考えられる。標準型吻合の場合ではグラフトから流入した血流は頭側と足側に分かれてはいたが、頭側流線は小さく、頭側流出路で血流は停滞しているものと考察された。一方、カフの中には、大きな渦が形成されその流線は頭側流出路にも至っていた。このように、適切な渦をつくることにより吻合部内の血液のよどみを減少させることは、カフ付き吻合の利点の一つであるとdeveloperたちが報告しているが、これを実際に数値で表すのは単純な方法では不可能であるが、頭側の血流が全く認められないような症例の場合に限っては、今回呈示したような、cine-angiography法を用いたvideodensitometry解析は有用な手段であると思われる。

今回の報告は、すべてのFPBにおいてカフ付き吻合がよいということを推奨するものではない。Griffithらのrandomized control studyでは、Miller cuffがAK FEM-POPに臨床上有用ではなかったと報告されている。Fisherらは、Miller cuffのデザインの違い(高さや長さ)によって、その効果に大きな差がでることを報告している⁹⁾。また、Howらは末梢での血流分配比も、末梢のhemodynamicsにおけるMiller cuffの効果に大きな影響を与えることを報告している。Griffithらの場合は、吻合部のデザインを統一した記載はなく、吻合部のデザイン大きさはさまざまであった可能性が含まれる。また、末梢の血流分配比も本研究で使用した100:0の血流分配比以外のものが含まれていたものと推論される。一方、本研究においては吻合部の三次元形態は厳密にはMiller cuffとは異なっている上に、末梢血流分配比は100:0にかぎって計算している。したがって今回の結果は、FPBの症例によっては、このデザインの吻合のほうが、シアーストレスの点から考えて有利な場合があるというシミュレーションの結果を報告しているものである。

例えば、この形状のカフを異なる血流分配比をもつ末梢吻合に使用した場合においても有利な流体力学的状況を作製するかどうかは不明である。同じサイズの

吻合部に同じデザインの末梢吻合部を作製したとしても、血管の伸展性などによる形態学的な差、生理学的にも存在する動脈波形の差や末梢血管病変の程度の差などによる流体力学的な差があることが想像される。したがって、カフ付き吻合の有効性を単純に末梢吻合部位を同一にして開存率のみで評価するのは妥当ではなく、局所の血行動態別に評価する必要があるものと考えられる。カフテクノロジーの適切な応用のためには、吻合作製後の局所の血行動態がどのようになるかを的確に判断する技術の発展も必要であるものと思われた。

結 語

カフ付き吻合を使用する末梢側吻合は、その内部において標準的な方法で作製された場合とは全く異なった流体力学的条件を呈することを示した。IBC CFDによる流体力学的な事象の解析は血管外科領域におけるバイパス閉塞などの事象に関して新しい知見をもたらす可能性があるものと考えられる。

本論文の一部は第33回日本血管外科学会総会(2005年6月、旭川)にて発表した。

文 献

- 1) How, T. V., Rowe, C. S., Gilling-Smith, G. L., et al.: Interposition vein cuff anastomosis alters wall shear stress distribution in the recipient artery. *J. Vasc. Surg.*, **31**: 1008-1017, 2000.
- 2) Imparato, A. M., Bracco, A., Kim, G. E., et al.: Intimal and neointimal fibrous proliferation causing failure of arterial reconstructions. *Surgery*, **72**: 1007-1017, 1972.
- 3) LoGerfo, F. W., Soncrant, T., Teel, T., et al.: Boundary layer separation in models of side-to-end arterial anastomoses. *Arch. Surg.*, **114**: 1369-1373, 1979.
- 4) Bassiouny, H. S., White, S., Glagov, S., et al.: Anastomotic intimal hyperplasia: mechanical injury or flow induced. *J. Vasc. Surg.*, **15**: 708-717, 1992.
- 5) Batson, R. C., Sottiurai, V. S. and Craighead, C. C.: Linton patch angioplasty. An adjunct to distal bypass with polytetrafluoroethylene grafts. *Ann. Surg.*, **199**: 684-693, 1984.
- 6) Miller, J. H.: The use of the vein cuff and PTFE. *Vascular Surgical Techniques*, 2nd Ed., Saunders, W. B., 1989, pp. 276-286.
- 7) Taylor, R.S., Loh, A., McFarland, R. J., et al.: Improved technique for polytetrafluoroethylene bypass grafting: long-term results using anastomotic vein patches. *Br. J. Surg.*, **79**: 348-354, 1992.
- 8) Fisher, R. K., Kirkpatrick, U. J., How, T. V., et al.: The distaflo graft: a valid alternative to interposition vein? *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.*, **25**: 235-239, 2003.
- 9) Fisher, R. K., How, T. V., Carpenter, T., et al.: Optimising miller cuff dimensions: the influence of geometry on anastomotic flow patterns. *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.*, **21**: 251-260, 2001.
- 10) Kuwahara, K. and Komurasaki, S.: Simulation of high reynolds number flows using multidirectional upwind scheme. *AIAA*, 2002-0133.
- 11) Mitsuoka, H., Unno, N., Takei, Y., et al.: Videodensitometric blood flow analysis of abdominal aortic aneurysm and intravascular coagulation. *J. Vasc. Surg.*, **38**: 340-345, 2003.
- 12) Steinman, D. A., Vorp, D. A. and Ethier, C. R.: Computational modeling of arterial biomechanics: insights into pathogenesis and treatment of vascular disease. *J. Vasc. Surg.*, **37**: 1118-1128, 2003.
- 13) Frangos, J. A., Eskin, S. G., McIntire, L. V., et al.: Flow effects on prostacyclin production by cultured human endothelial cells. *Science*, **227**: 1477-1479, 1985.
- 14) Fukuda, S., Mitsuoka, H. and Schmid-Schönbein, G. W.: Leukocyte fluid shear response in the presence of glucocorticoid. *J. Leukoc. Biol.*, **75**: 664-670, 2004.
- 15) Mitsuoka, H., Kistler, E. B. and Schmid-Schönbein, G. W.: Generation of in vivo activating factors in the ischemic intestine by pancreatic enzymes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, **97**: 1772-1777, 2000.

Image Based Computational Fluid Dynamics Related to the Hemodynamic Effects of Distal Anastomotic Cuff in Femoro-popliteal Bypass

Hiroshi Mitsuoka¹, Siro Kitamura², Kunio Kuwahara³
and Naoki Unno⁴

1 Department of Cardiovascular Surgery, Shizuoka Red Cross Hospital

2 Institute of Computational Fluid Dynamics

3 Japan Aerospace Exploration Agency

4 Department of Vascular Surgery, Hamamatsu University School of Medicine

Key words: Angiography, Distal anastomosis, Hemodynamics, Computational fluid dynamics, Wall shear stress

Background: Flow patterns inside a cuffed anastomosis are influenced by subject-specific 3D geometry. We attempted to evaluate the hemodynamic advantages of femoro-popliteal bypass using a pre-designed cuffed graft by image based computational fluid dynamics (CFD). **Methods:** 3D geometry was investigated by 3D digital subtraction angiography (3D DSA) and cine-angiography. Local rheological factors at the distal anastomosis were calculated by CFD analysis. The obtained data were compared to the results of calculation in a virtual model of classical end-to-side anastomosis for this case. **Results:** The distal anastomotic cuff eliminated the low shear stress area which would be observed at the heel of anastomosis created in a conventional end-to-side fashion. Cine-angiography of real cases suggested the beneficially changed flow pattern may enhance the clearance of blood from the anastomosis. **Conclusion:** Clinical CFD analysis based on 3D DSA demonstrates case-specific local flow dynamics. Image based CFD may add further information on patency estimation. (Jpn. J. Vasc. Surg., 15: 415-420, 2006)