

令和 3 年 5 月 18 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K10723

研究課題名(和文)CFDを用いたCABG患者個別最適化モデルの構築と3D printerによる応用

研究課題名(英文)Computational fluid dynamic study of various different individual coronary artery bypass grafting model

研究代表者

松浦 馨(Matsuura, Kaoru)

千葉大学・医学部附属病院・助教

研究者番号：50436375

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：CABGのCFD最適化モデルでは完全閉塞モデルや狭窄モデル等多くの結果が得られ、2報の英文原著論文として発表した。さらに、多枝バイパスモデルでも、詳細な検討を行い、より狭窄度の低い血管を先に吻合したほうが、エネルギー効率が高いことを血流解析で証明することができた。また実際のCABG術後患者の画像を用いたCFDモデルの作成では、まず典型的なCABGの吻合モデルであるITA-LAD吻合のCFDモデルを作成し、様々な角度から解析を行い、こういった形状での吻合がエネルギー効率が高いか解析を行った。結果、流出血管が大きい、吻合径やグラフトが大きい方がよりエネルギー効率が良い結果であった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複雑な冠動脈病変には冠動脈バイパスがカテーテル治療より優れているという研究結果が得られてきた一方で冠動脈バイパスのComputational fluid dynamics (CFD) 研究はシンプルな吻合形態についての研究にとどまり、複雑なバイパス吻合形態のどれが血行動態力学的に最適なのかという検討はいまだに乏しいのが現状であった。今回の我々の研究により、理想的な血行動態を示す冠動脈バイパスの吻合形態や、グラフトデザインを示すことができ、冠動脈バイパス術の適応の再確認につながったと考える。また今回の結果により患者説明、医学教育に寄与するだけでなく、病態把握へ重要な役割を果たすことができると考える。

研究成果の概要(英文)：e conducted the computational fluid dynamic study of the various individual models. In the native occlusion model, diamond sequential anastomosis would be an effective option for sequential bypass because of the better flow to the bypass outlet than with parallel anastomosis. Flow competition should be kept in mind while using diamond anastomosis for moderately stenotic vessels because of worsened flow to the native outlet.

In the native coronary stenosis and end-side anastomosis model, an anastomosis length of 8 mm was the ideal length with less flow complexity, low OSI, and less energy loss and high energy efficiency in the native 90% stenosis model.

In the multiple coronary artery bypass model, It was ideal to bypass the less severe stenosis vessel first with a parallel anastomosis method when employing multiple sequential bypass grafting. This improved hemodynamic stability and energy efficiency, according to a computational fluid dynamics model.

研究分野：心臓血管外科

キーワード：心臓血管外科 冠動脈外科 数値流体力学的研究 解析モデル

1. 研究開始当初の背景

- 1.) 本研究申請者はこれまで冠動脈バイパス術の有効性について臨床的観点から多数報告を行ってきた。今回、最も理想的な冠動脈バイパスの血流動態的優位性を示すことにより、冠動脈バイパス術の適応再確認にもつながると考えた。
- 2.) 複雑な冠動脈病変には冠動脈バイパスがカテーテル治療より優れているというコンセンサスが得られるようになってきた一方で冠動脈バイパスの Computational fluid dynamics (CFD) 研究はシンプルな吻合形態についての研究にとどまり、複雑なバイパス吻合形態のどれが血行動態力学的に最適なのかという検討はいまだに乏しい。CFD の進歩とともに冠動脈のような極小血管でも新たな知見が得られてきているが、得られた血流動態的知見と術前画像を合わせることで、理想的なモデルを術前に提示することは未だなしえていない。今回我々は CFD モデルを用いて血流動態力学的考察を行い、患者説明、医学教育に寄与するだけでなく、病態把握へ重要な役割を果たすことができると考えた。

2. 研究の目的

本研究は冠動脈バイパスについて、まずは最適化モデル、つぎに実際の術前術後の画像を用いて CFD モデルを作成し、血流動態力学的な考察と、心臓血管外科の臨床的考察を加えることで、最適な冠動脈バイパスモデルを解明することを目的とする。また実際の患者の術前に理想の CFD を作成することによって、リアルタイムに治療戦略を確立することを最終目的とした。

3. 研究の方法

1.) 冠動脈バイパスの CFD を用いた血行力学的最適化モデリング (Step 1)

様々な冠動脈バイパスモデルを作成し、それぞれにおいて理想的なモデルを検討した。具体的には CABG モデルの geometry は Solid Works 13.0 で構築し、Fluid dynamic computation には ANSYS CFX 16.0 を使用した。完全閉塞モデルの他、native 中等度狭窄モデル、血管径不均等モデル、他枝バイパスモデルなども検討した。いずれにおいても Sequential だけでなく End-side も検討した。最適な吻合長、あるいは吻合角についても検討を行った。また流入条件として実際の手術で測定した Medistim 社 VeriQ の Transient time flow measurement (TTFM) を用いて測定した血流波形を inlet 境界条件とするが、それによってバイパスマテリアル別の特徴も検討する予定である。前述のように flow や energy efficiency だけでなく、血流の流線パターン (Streamline)、せん断応力 Wall shear stress (WSS)、せん断応力のベクトルゆらぎを示す Oscillatory shear index (OSI) なども測定し、その分布についても検討した。

2.) 患者個別モデルによる血行力学最適化モデリング (Step 2)

冠動脈バイパス術後患者から心電図同期 MDCT 画像を得て、DICOM 形式でコンピュータ処理を行い、分岐形状やグラフトを含んだ冠動脈 3 次元形状モデルを構築する。また VeriQ システムによる TTFM の flow データを計算の境界条件として課す。バイパスの inflow ごとに検討を行った。流体力学ソルバによって冠動脈内部の 3 次元血流計算を行うことにより、の Step 1 での検討を同様に言い、flow competition の生じない、バ

バイパス術における最適な冠動脈グラフトデザインの予測・評価を行った。

- 3.) 実際の冠動脈バイパス術前患者の心電図同期 MDCT 画像から、患者個別の冠動脈狭窄および血流動態の CFD モデルを作成した。そこに Step 1、 Step 2 で得られた最適化 inflow バイパスモデルをあてはめ、リアルタイムに最も理想的な冠動脈バイパスモデルを CFD モデルとして作成した。

4 . 研究成果

最適化モデルでは完全閉塞モデルの他に狭窄モデルで多くの結果が得られ、これまで国内外の学会、および 2 報の英文原著論文として発表した。さらに、多枝バイパスモデルについては、詳細な検討を行い、より狭窄度の低い血管を先に吻合したほうが、エネルギー効率が低いことを血流解析で証明することができた。

また実際の CABG 術後患者の画像を用いた CFD モデルの作成については、まず典型的な CABG の吻合モデルである ITA-LAD 吻合の CFD モデルを作成し、実際の患者の画像から様々な角度から解析を行い、どういった形状での吻合がエネルギー効率が低いのか解析を行った。結果、流出血管が大きい、吻合径やグラフトが大きい方がよりエネルギー効率が低い結果であった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Matsuura Kaoru, Jin Wei Wei, Liu Hao, Matsumiya Goro	4. 巻 26 (4)
2. 論文標題 Computational fluid dynamics study of the end-side and sequential coronary artery bypass anastomoses in a native coronary occlusion model †	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery	6. 最初と最後の頁 583 ~ 589
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/icvts/ivx376	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsuura Kaoru, Jin Wei Wei, Liu Hao, Matsumiya Goro	4. 巻 11 (2)
2. 論文標題 Computational fluid dynamic study of different incision length of coronary artery bypass grafting in a native coronary stenosis model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Thoracic Disease	6. 最初と最後の頁 393 ~ 399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21037/jtd.2019.01.35	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsuura Kaoru, Jin Wei Wei, Liu Hao, Matsumiya Goro	4. 巻 31 (5)
2. 論文標題 Computational fluid dynamic study of multiple sequential coronary artery bypass anastomoses in a native coronary stenosis model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Coronary Artery Disease	6. 最初と最後の頁 458 ~ 463
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1097/MCA.0000000000000864	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kaoru Matsuura MD, PhD, Wewei Jin, Hao Liu, Goro Matsumiya.
2. 発表標題 Computational fluid dynamic study of sequential coronary artery bypass grafting in the native coronary occlusion model : Distribution of flow and energy efficiency.
3. 学会等名 2017 31th European Association of CardioThoracic Surgery Annual meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kaoru Matsuura
2. 発表標題 Computational fluid dynamic study of sequential coronary artery bypass grafting in the native coronary occlusion model: Distribution of flow and energy efficiency
3. 学会等名 2018 SJTU Workshop (Joint Seminar with JSPS Core-to-Core Program) on Medical Imaging and Computational Modeling in Cardiovascular and Pulmonary Diseases (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasunori Yakita, Kaoru Matsuura
2. 発表標題 Computational fluid dynamic study of end-side anastomosis after coronary artery bypass grafting
3. 学会等名 STS 56th Annual meeting. (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松浦馨、上田秀樹、黄野皓木、田村友作、渡邊倫子、乾友彦、稲毛雄一、焼田康紀、松宮護郎
2. 発表標題 Native完全閉塞CABGモデルにおける各吻合形態の血流動態、特にflowとenergy efficiencyの分布について
3. 学会等名 第70回日本胸部外科学会定期学術集会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 焼田康紀、松浦馨、松宮護郎
2. 発表標題 心電図同期冠動脈3DCTを用いた血流解析モデルの作成: ITA - LAD吻合について
3. 学会等名 第9回血流会 in Chiba
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松浦馨、上田秀樹、黄野皓木、田村友作、渡邊倫子、乾友彦、稲毛雄一、焼田康紀、松宮護郎
2. 発表標題 Native coronary 狭窄end-side吻合CABGモデルでのCFD解析 - 吻合長の影響
3. 学会等名 第48回日本心臓血管外科学会学術総会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 焼田康紀、松浦馨、上田秀樹、黄野皓木、田村友作、渡邊倫子、乾友彦、稲毛雄一、若林豊、山田隆熙、山本浩亮、松宮護郎
2. 発表標題 心電図同期冠動脈3DCTを用いた血流解析モデルの作成: ITA - LAD吻合について
3. 学会等名 第48回日本心臓血管外科学会学術総会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松浦馨、Jin Wei Wei、Liu Hao、松宮護郎
2. 発表標題 Native完全閉塞のCABGモデルにおける各吻合形態の血流動態について
3. 学会等名 第34回日本医工学治療学会学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松浦馨、焼田康紀、上田秀樹、黄野皓木、榎本吉倫、渡邊倫子、乾友彦、平岡大輔、若林豊、諫田朋佳、藤井政彦、伊藤駿太郎、松宮護郎
2. 発表標題 End-side吻合CABG VFDモデルでのnative閉塞モデルと狭窄モデルに比較
3. 学会等名 第23回日本冠動脈外科学会学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松浦馨、上田秀樹、黄野皓木、田村友作、渡邊倫子、乾友彦、稲毛雄一、焼田康紀、若林豊、柴田裕輔、山田隆熙、山本浩亮、松宮護郎
2. 発表標題 CFD解析を用いたMultiple sequential CABGモデルの血流動態の検討
3. 学会等名 第71回日本胸部外科学会定期学術集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 焼田康紀、松浦馨、上田秀樹、黄野皓木、榎本吉倫、渡邊倫子、平岡大輔、乾友彦、若林豊、諫田朋佳、藤井政彦、伊藤駿太郎、松宮護郎
2. 発表標題 CABG術後、心電図同期冠動脈3DCTを用いた血流解析モデルの作成：end-side吻合について
3. 学会等名 第49回日本心臓血管外科学会学術総会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 焼田康紀、松浦馨、上田秀樹、黄野皓木、渡邊倫子、乾友彦、平岡大輔、諫田朋佳、藤井政彦、池内博紀、坂田朋基、西織浩信、松宮護郎
2. 発表標題 CABG術後、心電図同期冠動脈3DCTを用いた血流モデルの解析：SVGについて
3. 学会等名 第72回日本胸部外科学会定期学術集会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	松宮 護郎 (MAYSUMIYA Goro) (20314312)	千葉大学・大学院医学研究院・教授 (12501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	上田 秀樹 (UEDA Hideki) (50738987)	千葉大学・医学部附属病院・講師 (12501)	
研究分担者	黄野 皓木 (KOHNO Hiroki) (40375803)	千葉大学・医学部附属病院・助教 (12501)	
研究分担者	渡邊 倫子 (WATANABE Michiko) (20766274)	千葉大学・医学部附属病院・助教 (12501)	
研究分担者	劉 浩 (LIU Hao) (40303698)	千葉大学・大学院工学研究院・教授 (12501)	
研究分担者	田村 友作 (TAMURA Yusaku) (60738988)	千葉大学・医学部附属病院・助教 (12501)	削除：2018年3月12日
研究分担者	焼田 康紀 (YAKITA Yasunori) (40790671)	千葉大学・医学部附属病院・助教 (12501)	追加：2018年3月12日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------