

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：51101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25860923

研究課題名(和文) 臍帯血流予測シミュレーション技術とそれを用いた臨床胎児状態評価支援システムの開発

研究課題名(英文) Development of a Fetal Assessment System using Umbilical Blood Flow Simulation

研究代表者

森 大祐 (MORI, Daisuke)

八戸工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：50451539

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：複雑に捻転・蛇行する臍帯血管の形状モデルを構築し、それらの形状的特徴が内部の血流に及ぼす影響をコンピュータシミュレーションにより調査した。これにより、捻転度によっては、ある部位の血流波形が必ずしもその上流側の、すなわち、臍帯動脈では胎児からの、臍帯静脈では胎盤からの血流波形の情報をそのまま反映しているとは限らないことが分かった。さらに、蛇行を模擬した場合には断面の円周方向のみならず流路の軸方向にも有意な流体力学量の変化があり、より局所的な分布が引き起こされることが確認された。また、これらのシミュレーションの実施を通して、臨床における胎児状態評価を支援するシミュレータのプロトタイプを構築できた。

研究成果の概要(英文)：We constructed computational models of fetal umbilical blood vessels with complex coiled geometry, and investigated effect of the geometrical characteristic on blood flow via computational simulation. The results using simply coiled models showed that flow velocity profile captured by clinical diagnostic devices such as ultrasonic testing can be significantly influenced by the intensity of coiled geometry. The results using complicatedly coiled models with a second-order spiral geometry demonstrated higher localization in distribution of fluid mechanical quantities. Moreover, the models and techniques constructed through this study would be a prototype of simulator which supports clinical assessment of fetal well-being.

研究分野：計算生体力学

キーワード：臍帯血流 計算流体力学 胎児状態評価 臍帯捻転

1. 研究開始当初の背景

子宮内で発育する胎児の状態評価において超音波ドプラ血流計測法などを用いた非侵襲的な臍帯内の血流検査は临床上重要である。しかしながら、これらの検査方法、および、診断方法には、以下のような問題点がある。

(1) 限定的な計測部位による断片の情報

臍帯は一般的な胎児で全長約 50 cm あり、臍帯動脈と臍帯静脈とが絡み合いながら螺旋状に捻転する特徴的な形状をしている。また、体内において胎児が姿勢を変えるにつれ臍帯が大きく変形し、場合によっては臍帯が2, 3重にもわたって胎児に絡み付く巻絡と呼ばれる状態になる。このように複雑な形状を有する臍帯血管に対して超音波プローブによって測定されるのはそのうちのごく一部の断面に限られる。

(2) 計測誤差と定性的評価指標

臍帯血管は複雑に蛇行しているため、計測実施者の手技の習熟度によって必ずしも一定の結果が得られないなどの種々の誤差要因がある。このため、血流量や血流速度などの絶対値は計測誤差が大きい。臨床の医療現場では胎児状態評価に定性的な指標を用いている。例えば、収縮期最高血流速度と拡張末期血流速度のみから算出される RI 値 (Resistance Index) や、それに対して平均血流速度を加味した PI 値 (Pulsatility Index) などである。

(3) 経験則による診断

上記(1), (2)のような計測法から得られる情報は断片的かつ定性的であるため、診断は経験則に頼らざるを得ないところがある。

このように断片的で定性的な評価指標を用いた経験則による診断を改善し、より包括的で定量的な科学的根拠に基づく診断を確立するためには、胎児個々に異なる捻転や巻絡などにより複雑な形状を有する臍帯血管の全体的な血流動態を詳細に理解し、臍帯血流波形の断片の情報との関連性を明確にし再検討する必要がある。

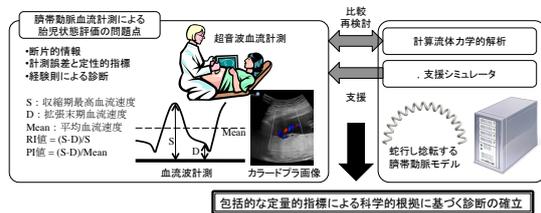


図1 研究の背景と目的

2. 研究の目的

そこで本研究では、子宮内で発育する胎児の状態評価において临床上重要な検査対象である臍帯血流の計算流体力学的解析を試みる。臍帯血管形状の特徴である捻転、および、巻絡に着目し、それらの形状特徴が臍帯血流に及ぼす影響を明らかにし、断片的かつ定性的な血流情報のみから経験則に基づいて行われてきた従来の臍帯血流による胎児状態評価の診断指針・基準を再検討ならびに再整理する

ことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 捻転する臍帯血管モデルの計算流体力学的解析

図2に示すような捻転の度合いが異なる螺旋状の流路を持つ形状モデルを作成し、その内部の流れの計算流体力学的解析を実施する。形状モデルを作成するための入力パラメータは螺旋半径、動脈半径、螺旋の勾配角度とし各種の捻転度を有するパラメトリックな臍帯血管の形状モデルを作成する。得られた結果より捻転度の違いが血流にどのように影響するかを調査する。さらに、超音波プローブを当てる場所、角度などによってどのような診断画像、血流波形が得られるかを仮想的にシミュレーションする。



図2 各種の捻転を有する臍帯動脈モデル (蛇行しない場合)

(2) 蛇行しながら捻転する臍帯血管モデルの計算流体力学的解析

蛇行する臍帯内の臍帯血管内の血流を計算流体力学的手法により解析する。前述(1)では臍帯は蛇行せずまっすぐであると近似した臍帯血管モデルを考えた。しかしながら、胎内では胎児は有意に運動しそれに従い臍帯自体が大きく蛇行する。このように蛇行した臍帯内の血流の計算流体力学的解析を実施する。前述の常螺旋流路モデルに対して、図3に示すような螺旋の中心軸に曲率を持たせた形状モデルを作成する。これにより、捻転かつ蛇行する臍帯血管の形状が血流に及ぼす影響を調査する。さらに、超音波プローブを当てる場所、角度などによってどのような診断画像、血流波形が得られるかを仮想的にシミュレーションする。



図3 蛇行する臍帯の臍帯動脈モデル

4. 研究成果

(1) 捻転する臍帯血管モデルの計算流体力学的解析

捻転の度合いが段階的に異なる螺旋状円管流路の計算モデルを作成し(図4), 生体内における周期的拍動流を想定した条件の下でモデル内の流れの解析を行った。

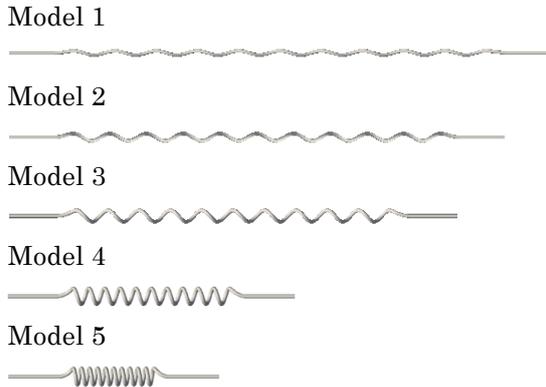


図4 捻転度の異なる臍帯血管モデル

図5は、超音波などによる血流波計測を想定し、ある一定方向（モデルの長手方向）から超音波プローブを当てた際の各モデルにおける計測血流速度波形を再現したものを示す。超音波計測はプローブを当てた方向の速度成分を抽出するため、ピッチが大きく捻転度が低く、流れの主流が管軸に沿うモデルほど波形の振幅が大きく現れた。波形の形状について着目すると、ピッチが小さく捻転度が高い場合は入口流入条件として与えた正弦波形を比較的良く再現する形を示した。しかしながら、ピッチが大きく捻転度が低い場合は最大流速時近傍で一時的な速度の減少が1時点ないし2時点において現れ波形の乱れが観察された。このことは、捻転度によっては、ある部位の血流波形が必ずしもその上流側の、すなわち、臍帯動脈では胎児からの、臍帯静脈では胎盤からの血流波形の情報をそのまま反映しているとは限らないことを示している。したがって、このような結果は、臨床における超音波などによる血流測定で得られたデータは、捻転の形式も考慮したうえで慎重に考察する必要があることを指摘するものである。

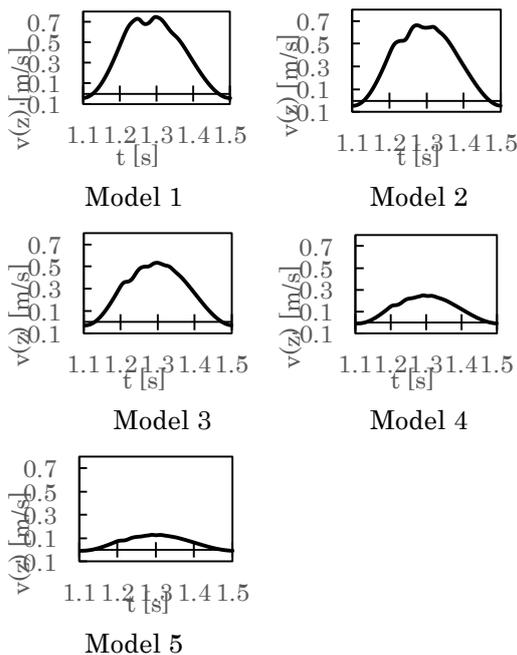


図5 各モデルにおける1周期の流速波形

(2) 蛇行しながら捻転する臍帯血管モデルの計算流体力学的解析

コイル形状の螺旋中心軸が一直線で蛇行しない流路モデル（図6-a）に対し、螺旋中心軸を半径 $R = 5, 4, 3$ [cm]の円弧とし、蛇行を模擬した流路モデル（図6-b, c, d）を作成した。

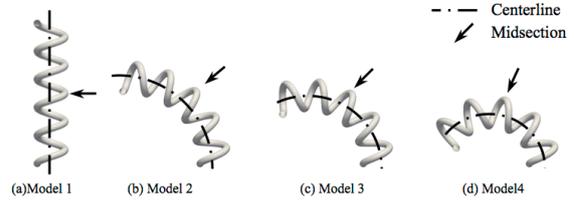


図6 蛇行を考慮した臍帯血管モデル

図7は各モデルの中間部の断面における速度分布である。色の寒暖は軸流速の大小を表し、矢印は断面二次流れを表す。いずれのモデルも螺旋流路であるため、曲がり管で見られる双子渦を基本として、流路の捩れの影響を受け左右非対称な二次流れの分布を示すが、蛇行しないモデルに比べ蛇行するモデルではその非対称性がより強く現れた。これは蛇行するモデルでは螺旋の中心軸自体が曲率を有しており流れに対してより強い遠心力の効果を与えたためと思われる。

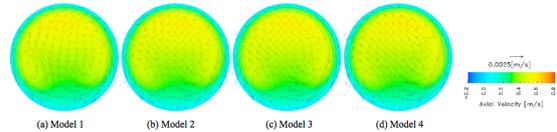


図7 軸流速分布と二次流れ

図8は図6-dに示すモデルにおける壁面せん断応力の分布を示す。蛇行しないモデルにおいては流れが完全発達した後は各断面における壁面せん断応力プロファイルは変化しないのに対して、蛇行するモデルでは螺旋の1ピッチ中に壁面せん断応力プロファイルの変化が観察された。図9は図6-dのモデルにおいて3ピッチ目のらせり流路を4等分した断面位置における壁面せん断応力の円周方向プロファイルを示したものである。蛇行を模擬した場合には断面の円周方向のみならず流路の軸方向にも有意な壁面せん断応力の変化があり、より局所的な分布が引き起こされることが確認された。

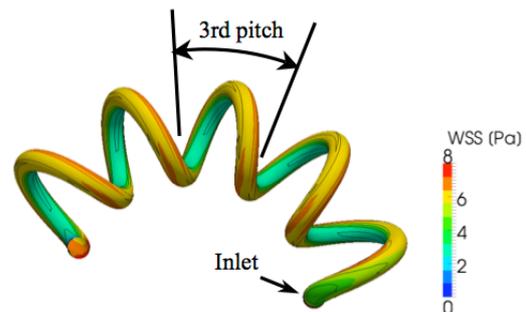


図8 蛇行臍帯血管モデルにおける壁せん断応力分布

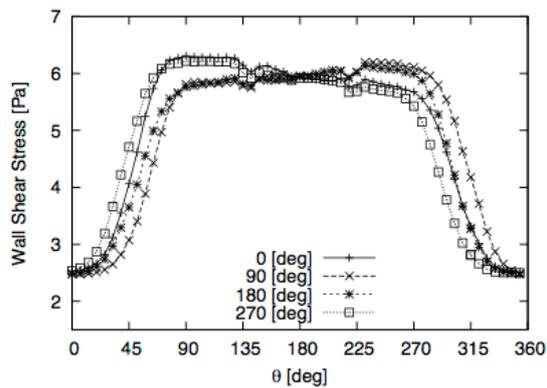


図9 蛇行臍帯血管モデルにおける壁せん断
応力円周方向プロファイル

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 森 大祐, 計算流体力学による臍帯血流の解析-捻転および巻絡が血流に及ぼす影響-, 八戸工業高等専門学校紀要, 第49号, 査読なし, 2014, pp. 13-15

[学会発表] (計3件)

- ① 森 大祐, 循環器における血液流動現象とその病態生理学的意義解明への計算生体力学的アプローチ, ものづくり産業パートナーフォーラム in ひろさき, 2015年10月28日, ホテルナクアシティ弘前(青森県・弘前市)
- ② 佐々木佳奈, レドゥアン, 森 大祐, 臍帯内の螺旋状血管の血流に関する計算流体力学的解析, 日本機械学会東北学生会第45回卒業研究発表講演会, 2015年3月10日, 八戸工業高等専門学校(青森県・八戸市)
- ③ 森 大祐, 臍帯血流予測シミュレーションを用いた胎児状態評価支援に関する研究, 第12回全国高専テクノフォーラム, 2014年8月21日, 札幌コンベンションセンター(北海道・札幌市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 大祐 (MORI DAISUKE)

八戸工業高等専門学校・産業システム工学
科 機械システムデザインコース・准教授

研究者番号: 50451539