

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 4日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760124

研究課題名（和文）

血流における脈動の必然性と再層流化プロセスの解明

研究課題名（英文）

Analyses of Inevitable Pulsation in Blood Flow and Re-laminarization Process

研究代表者

岩本 薫（IWAMOTO KAORU）

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50408712

研究成果の概要（和文）：血流を模擬した脈動流の数値計算，及び室内実験を実施し，血液輸送の効率化という観点から，血流が脈動している本質を評価した．その結果，加速期間では，無次元圧力勾配がある閾値を超える期間を長くし，かつ加速期間における平均圧力勾配は小さくすること，他方，減速期間では，短い減速期間において強い逆圧力勾配で減速させることにより，再層流化が誘起され，抵抗低減効果が得られることが分かった．

研究成果の概要（英文）：A pulsating simulated blood flow has been experimentally and numerically examined in order to evaluate the inevitability of pulsation in blood flow from a viewpoint of efficiency in blood supply. In the acceleration period, the drag reduction rate increases and re-laminarization process is induced with decreasing the amplitude of the mean pressure gradient in the acceleration phase with the longer acceleration period. As for the deceleration period, the drag reduction rate increases with larger negative mean pressure gradient in the deceleration period with the shorter deceleration period.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：熱流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流，血流，再層流化，直接数値計算，脈動

## 1. 研究開始当初の背景

人体などの哺乳類における血流に関する研究は，生理学的，及び流体力学的観点から数多く実施されている．従来の流体力学的研究では，分岐や曲がりのある複雑な血管形状，血管の伸縮性，脈動性，血球などによる二相流などを対象としている．その主目的は，動脈瘤の発生・破裂メカニズムや溶血・血栓・

動脈硬化に対する知見を得ることである．しかしながら，「なぜ血流は脈動しているのか」という基本的な疑問に言及した研究は皆無である．

本研究代表者は，生物の進化による最適化が血液輸送にも適用されているのではないかと考え，流体の輸送効率に与える脈動性の影響を世界に先駆けて解明した．具体的には，

平行平板間脈動乱流の直接数値計算 (DNS) と、円管内脈動乱流の室内実験を実施した。その結果、脈動流の輸送エネルギーの平均値が定常流の値より大幅に減少することが分かった。これは定常流の場合では乱流であるレイノルズ数において層流状態を維持しながら脈動しているためである。

上述の DNS や室内実験における脈動流の駆動源である圧力勾配波形は、矩形波的に時間変化させている。国内やイタリア、デンマーク、米国、英国などで、脈動乱流やその遷移に関する研究が実施されているが、そのほとんどが正弦波状に圧力勾配を変化させている。他方、血流では一定時間のみ大きな圧力勾配が付加され、その後では圧力勾配が除去されて徐々に減速する。このような複雑な圧力勾配が付加された場合の流体力学的知見は皆無である。本研究では、血流を模擬した脈動流の数値計算、及び室内実験を実施し、血液輸送の効率化という観点から、血流が脈動している本質を解明する。

## 2. 研究の目的

本研究では、血流の輸送効率に与える脈動性の影響のみに焦点をあて、血流が脈動している本質を解明する。血流を模擬した脈動乱流の室内実験、及び直接数値計算を実施し、乱流の準秩序構造、統計量の時系列変化を詳細に調査し、脈動流に関する普遍的知見を得る。

### (1) 円管内脈動乱流の室内実験の実施

血流の圧力波形を模擬した円管内脈動乱流の室内実験を実施し、圧力波形が流体輸送効率に与える影響を系統的に調査する。輸送効率を最大にする再層流化プロセスを引き起こす圧力波形を特定し、既存の粒子画像流速測定装置を用いて、2次元流速分布の時間変化を調査する。

### (2) 円管内脈動乱流の直接数値計算の実施

前述の室内実験で得られた再層流化を伴う圧力波形を用いて、円管内脈動乱流の直接数値計算をスーパーコンピュータで実施する。3次元流速分布や詳細な統計量の時間変化を調査し、再層流化を誘発するメカニズムを解明する。

## 3. 研究の方法

### (1) 円管内脈動乱流の室内実験の実施

血流の圧力波形を模擬した円管内脈動乱流の室内実験を実施し、圧力波形が流体輸送効率に与える影響を系統的に調査する。ポンプの回転数をインバータで制御し、周期的に変化させて脈動流を作成する。1 ケースに要する実験時間は約 30 分であり、インバータの制御を PC で自動化することにより、総計

約 700 ケースのデータを取得し、パラメトリックスタディを実施する。

この結果と、血流の圧力波形を比較する。生理学的研究によると、無病状態の血流では層流か僅かな乱流遷移が、病的状態では乱流が主として観測される。どの圧力波形の成分が層流化、乱流化を誘発しているかを定量的に解析する。

再層流化するケースでは、現有の粒子画像流速測定装置 (PIV) を用いて、2次元流速分布の時間変化を調査する。どのような流れ場が層流化の主因であるかを、次項の直接数値計算とともに解明する。

### (2) 円管内脈動乱流の直接数値計算の実施

前述の室内実験で得られた再層流化を伴う圧力波形を用いて、円管内脈動乱流の直接数値計算を実施する。血流のような脈動流では、瞬間的なレイノルズ数が数万になり、約 2TB のメインメモリを要することから、スーパーコンピュータを使用する。2次元 PIV では得られない3次元流速分布や詳細な統計量の時間変化を調査し、再層流化を誘発するメカニズムを解明する。

急激な加速期間では、低・高速領域 (ストリーク構造)、及び渦構造が急激に弱体化し消失する。これは加速流で良く知られた現象である。他方、緩やかな減速期では、まずストリーク構造が現れ、流れ方向に伸長する。次に、ある領域でストリーク構造が揺動 (ミアンダリング) し、その領域において乱流斑点が生成する。この乱流斑点は急速に拡大し、計算領域のほぼ全域において渦構造が生成される。これらの渦構造は減速期間の後半において徐々に減衰する。以上のように、様々な3次元準秩序構造が時系列的に変化し、サイクルが完結する。完全な再層流化のキープポイントは、乱流斑点が生成されるか否かと考えられる。室内実験の2次元データとともに、どの圧力波形の成分が乱流斑点の生成・消滅に寄与するかを評価する。

## 4. 研究成果

### (1) 円管内脈動乱流の室内実験の実施

血流の圧力波形を模擬した円管内脈動乱流の室内実験を実施し、圧力波形が流体輸送効率に与える影響を系統的に調査した。ポンプの回転数をインバータで制御し、周期的に変化させて脈動流を作成した。1 ケースに要する実験時間は約 30 分であり、インバータの制御を PC で自動化することにより、総計約 700 ケースのデータを取得した。その結果、どの圧力波形の成分が層流化、乱流化を誘発しているかを定量的に解析した。

図 1 に各ケースの加減速期間別の抵抗低減率の等値線を示す。図 1 (a) に示す加速期

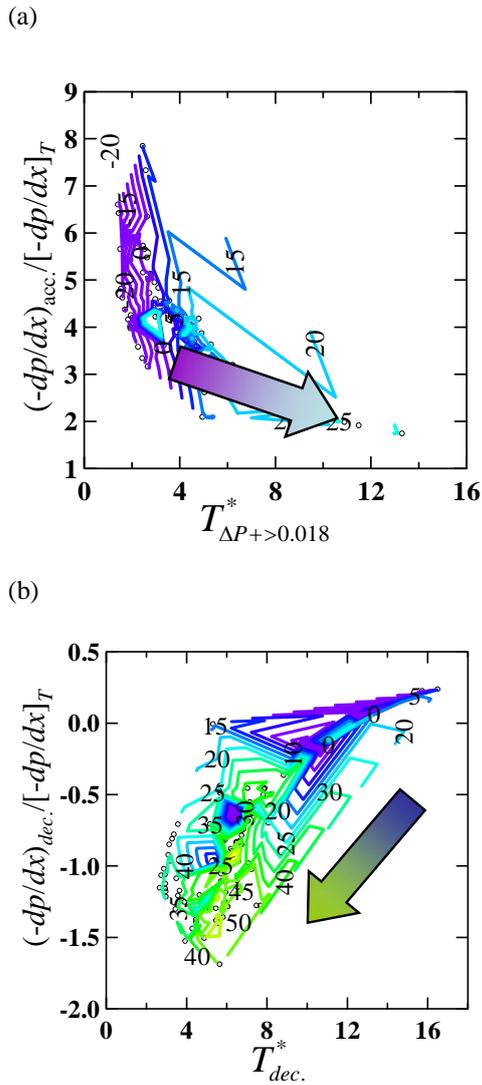


図 1 : (a)加速期間における抵抗低減率 [%], (b)減速期間における抵抗低減率.

間では、縦軸は加速期間における平均無次元圧力勾配を、横軸は無次元圧力勾配がある閾値を超える期間を示す。無次元圧力勾配がある閾値を超える期間を長くし、かつ加速期間における平均圧力勾配は小さくすることにより、抵抗低減率が増加していることが分かる。

他方、図 1 (b)に示す減速期間では、縦軸は減速期間における平均無次元圧力勾配を、横軸は減速期間を示す。図より、短い減速期間において強い逆圧力勾配で減速することにより、抵抗低減率が増加することが分かった。総じて、

- ・加速期間では、無次元圧力勾配がある閾値を超える期間を長くし、かつ加速期間における平均圧力勾配は小さくする
- ・減速期間では、短い減速期間において強い逆圧力勾配で減速させることにより、再層

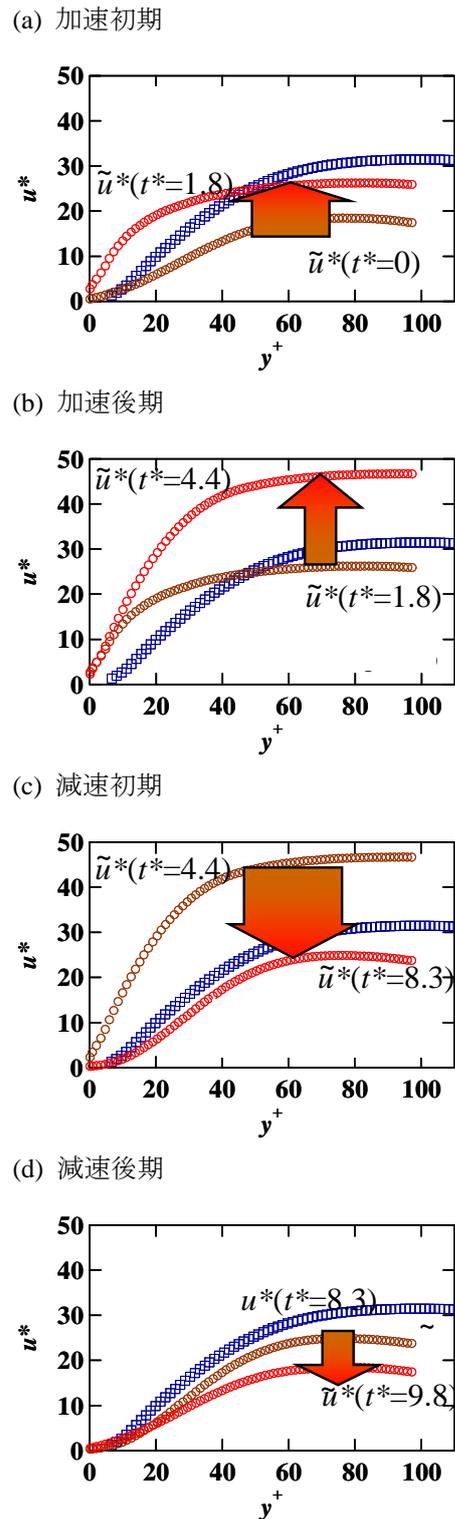


図 2 : 層流化時の位相平均速度分布. 青色プロットは定常乱流での値を示す.

流化が誘起されることを示した。

さらに、再層流化するケースでは、現有の粒子画像流速測定装置 (PIV) を用いて、2次元流速分布の時間変化を評価した。図 2 に結果を示す。加減速初期においては、管内の全

領域において流速が増減している。加減速後期においては、壁面から離れた位置のみにおいて流速が増減することが分かった。さらに、変動速度の標準偏差の分布や、レイノルズ応力の分布の時間変化も評価し、層流化のメカニズムを解析した。

#### (2) 円管内脈動乱流の直接数値計算の実施

前述の室内実験で得られた再層流化を伴う圧力波形を用いて、円管内脈動乱流の直接数値計算を実施した。2次元 PIV では得られない3次元流速分布や詳細な統計量の時間変化を調査し、再層流化プロセスにおける乱流準秩序構造の時系列変化を定性的に評価し、再層流化を誘発するメカニズムを解析した。

また、前述の室内実験で得られた再層流化を伴う圧力波形を用いて、室内実験では実施困難な高レイノルズ数における円管内脈動乱流の直接数値計算を実施した。高レイノルズ数においても、上記の条件を満たすことにより、再層流化が誘起されることを示した。

#### 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3件)

1. 相馬 颯子, 岩本 薫, 村田章, 円管内脈動乱流の摩擦抵抗低減効果に与える圧力勾配波形の実験的解析, 日本機械学会論文集 (B1 編), 78, 2012, 521-530, 査読有.
2. Akiko Souma, Kaoru Iwamoto, Akira Murata, Analysis of Turbulent Coherent Structures in Drag-Reducing Pulsating Pipe Flow, Proc. 4th International Forum on Multidisciplinary Education and Research for Energy Science, C122, 2011, pp.2, 査読有.
3. Akiko Souma, Kaoru Iwamoto, Akira Murata, PIV Measurement of Pulsating Turbulent Pipe Flow for Energy Saving, Proc. of The 21th International Symposium on Transport Phenomena, 205, 2010, pp.3, 査読有.

[学会発表] (計5件)

1. 岩本 薫, 生物の脈動原理に学ぶ管摩擦抵抗の低減技術 (招待講演), 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 14 日, 東京工業大学, 東京都.
2. 相馬 颯子, 岩本 薫, 村田章, PIV 計測を用いた摩擦抵抗低減効果を有する円管内脈動乱流の実験的研究, 流体力学会年会 2011, 2011 年 9 月 7 日, 首都大学東京, 東京都.

3. 岩本 薫, 乱流の高度制御技術 (招待講演), 神奈川大学工学研究科講演会, 2010 年 12 月 15 日, 神奈川大学, 神奈川県.
4. 岩本 薫, 脈動による配管動力の低減技術 (招待講演), 栗田工業株式会社講演会, 2010 年 11 月 11 日, 栗田工業株式会社, 栃木県.
5. 相馬 颯子, 岩本 薫, 村田章, 摩擦抵抗低減効果を有する円管内脈動乱流の PIV 計測, 第 88 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2010 年 10 月 30 日, 山形大学, 山形県.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

岩本 薫 (IWAMOTO KAORU)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 50408712

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし