心臓シミュレーションにおける移動境界条件を考慮した流脈線計算

Streakline calculation for human heart simulation with moving reference frame

○ 櫛部大介，富士通株式会社，東京都大田区新蒲田 1-17-25, E-mail: kushibe.daisuke@jp.fujitsu.com
渡邉正宏，富士通株式会社，東京都大田区新蒲田 1-17-25, E-mail: masahiro.w@jp.fujitsu.com
Daisuke Kushibe,　Fujitsu Limited,17-25, Shinkamata 1-chome, Ota-ku, Tokyo, 144-8588
Masahiro Watanabe, Fujitsu Limited, 17-25, Shinkamata 1-chome, Ota-ku Tokyo, 144-8588

In this study we present a streakline calculation method with moving frame in order to visualize blood flow in human heart. Due to the diastole and systole of the heart, we have to calculate streaklines considering myocardial motion. Moreover we need to use 4-th order runge-kutta method for exact time development of this streakline. As a result of this calculation, we could show that calculated streakline varied by the motion of myocardium. These results help understanding blood flow visualization in human heart.

1．序論

近年、流体力学の応用範囲はますます広がりを見せており、「京」コンピュータによる血流のシミュレーション, 脳動脈瘤の解析など生体分野への適用が進んでいる。2007 年より東京大学と共同研究を行っており、心臓シミュレータにより高精度な心臓の心筋・血液の挙動、興奮伝播状態の再現を行う事に成功した[1]。

心臓内部で血流がどのように流れているかを可視化する機能について、速度ベクトルの表示或いは流線(streamline)が代表的である。一方、時間的に変動する流れ場の可視化においては流脈線(streakline)による表示法が有効と考えられる。特に、各心房から心室への移動に関して、あるいは弁機能による血流の遮断と再度の流通など、流れる経路を調べるには流脈線は都合が良いと考えられる[2,3]。

心臓内の血流流れを精緻に表現する流脈線を開発する際、心筋部分が拍動しており、移動境界条件を考慮した流脈線計算をする必要がある。これが第一の課題である。第二の課題は演算精度である。正確な可視化のためには、正確な流脈線の計算が必要である。そのため、精度を考慮した流脈線の計算が必要であるが、高次のルンゲ・クッタ法等の解法を適用するためには、一般には場の情報が与えられていない時刻における速度場を推定する必要が生じる。これは精度だけなく、計算そのものの安定性（振動しないものが振動してしまう）にも関与するため、無視できない。第三の課題は計算量である。流脈線の計算では、線分の構成点の全てが時間発展対象となるが、計算のために全ての場の点の情報を推定すると計算量が増えてしまう。個々の点の時間更新に必要な要素は、時間発展の対象となる点近傍の情報だけで良いので、計算量を最小限に抑えるような計算法の開発が必要である。

第四の課題は、解析の観点で、流体部分の座標、速度場、心筋の座標のみで流脈線を計算する事である。可視化の観点では解析プログラムが解いたナビエ・ストークス方程式そのものを知ることはできない。また、計算に使用するグリッド点自体が時間に依存し、ALE 法を用いて、計算が破たんしないように時間に依存させて変化させている[4]。グリッド点自体も微分方程式に基づき座標を変化させる。可視化の観点では、出力ファイルの情報から大元の微分方程式の情報を知らなくても、出力時刻以外でのグリッド点座標、速度場を推定し、流脈線を計算する必要がある。

我々はこれらの４つの課題を解決し、心臓シミュレーションの結果から流脈線を計算した。

2．計算の概要

空間中に図１のように、粒子発生装置が設置されている。時刻$t=t_0$から、色つき粒子が粒子発生源から連続的に射出され、線分を構成する。流脈線においては、この線分を離散的なＮ点で記述できるとし、各時刻における速度場で時間発展を行った。

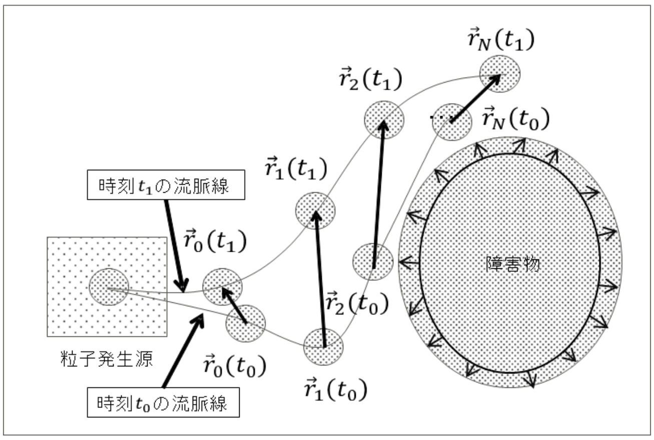

Fig. 1　流脈線の概念図

時間発展は４次のルンゲ・クッタ法を用いた。時刻$t=t_k$において、座標$\vec{r}_k$にある点は速度場$\vec{v}(\vec{r}_k,t_k)$を用いて、以下の(1)-(5)式に従って、時間発展させる。

$$\vec{r}_{k+1}=\vec{r}_k+\frac{\Delta t}{6}(\vec{v}_1+2\vec{v}_2+2\vec{v}_3+\vec{v}_4) \tag{1}$$

$$\vec{v}_1=\vec{v}(\vec{r}_k,t_k) \tag{2}$$

$$\vec{v}_2=\vec{v}(\vec{r}_k+\frac{\Delta t}{2}\vec{v}_1,t_k+\frac{\Delta t}{2}) \tag{3}$$

$$\vec{v}_3=\vec{v}(\vec{r}_k+\frac{\Delta t}{2}\vec{v}_2,t_k+\frac{\Delta t}{2}) \tag{4}$$

$$\vec{v}_4=\vec{v}(\vec{r}_k+\Delta t\vec{v}_3,t_k+\Delta t) \tag{5}$$

ここで、中間時刻$t_k+\frac{\Delta t}{2}$における場は出力ファイルで与えられた時刻におけるグリッド点、および速度場が再現されるようにスプライン法にて求めた。

3．結果

図２に示すのは、本計算にて計算した流脈線のスナップショッ

トである。空間の一点から粒子が射出され、時々刻々流れの変化により流脈線が変化している様子である。図 2(a)では、血液が下に向かって移動しているのが分かる。図 2(b)では左心室の下側の心筋のため、流脈線群は急激に曲がっている。その後、大動脈の方に向かう(図 2(c))。この時、左心室の収縮のため、流脈線は若干内側に向かう(図 2(d))。心筋の運動により速度場が変化し、流脈線の変化を引き起こす。

４．結論

心臓シミュレーションにおける、移動境界を考慮した流脈線計算を行った。計算精度を高めるため 4 次のルンゲ・クッタ法を使って計算を行った。計算の結果、流脈線自体が移動境界の影響で変化する事を示すことができた。

５．謝辞

本研究を遂行するに当たり、東京大学大学院 新領域創成科学研究科 人間環境工学専攻 杉浦清了特任教授、株式会社 UT-Heart 研究所久田俊明先生（東京大学名誉教授）にデータを提供して頂きました。深く御礼申し上げます。

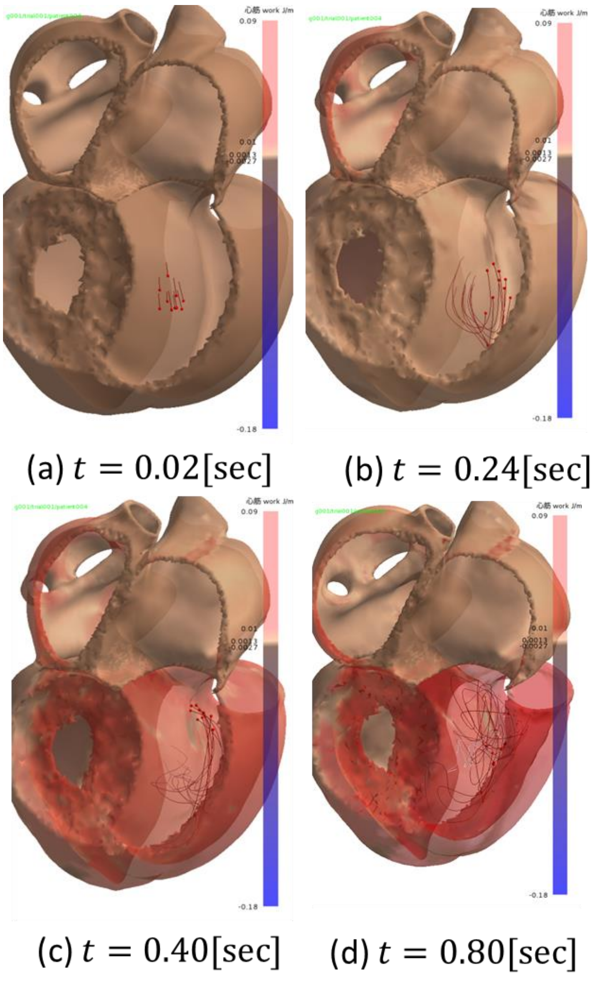

Fig. 2　標準心臓における流脈線.

参考文献

(1) Seiryo Sugiura, Takumi Washio, Asuka Hatano, Junichi Okada, Hiroshi Watanabe and Toshihisa Hisada, “Multi-scale simulations of cardiac electrophysiology and mechanics using the University of Tokyo heart simulator.”, Progress in Biophysics and Molecular Biology **110**(2012) 380-389.

(2) Tino Weinkauf and Holger Theisel, “Streak Lines as Tangent Curves of a Derived Vector Field.”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics(Proceedings Visualization 2010) **16(6),** November-December 2010.

(3) H. Liu and K. Kawachi, “A Numerical Study of Insect Flight”, JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS **146**, 124-156(1998)

(4) J. Donea, A. Huerta, J.-Ph. Ponthot and A. Rodriguez-Ferran, “Chapter 14 Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods”, Encyclopedia of Computational Mechanics, Edited by Erwin Stein, Rene de Borst and Thomas J.R. Hughes. Volume 1: ´ Fundamentals. 2004 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-84699-2.