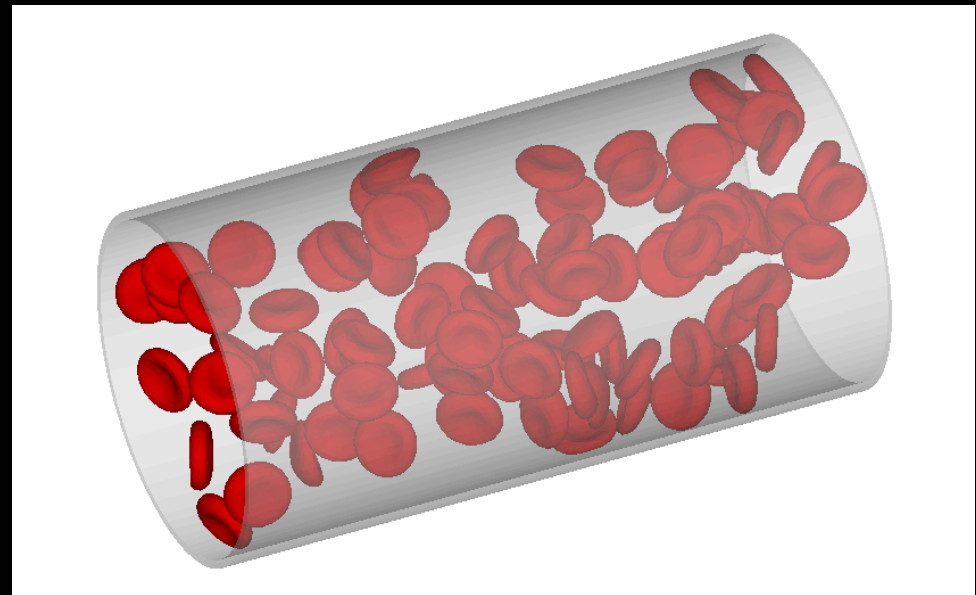


# DEMによる内部構造を持つ 複雑多相系の粒子モデル

## DEMコンソーシアム

責任者 阪口 秀

独立行政法人海洋研究開発機構(JAMSTEC)  
地球内部変動研究センター(IFREE)



# 研究目的

- 気相、液相、固相が混在していたり相転移を起こしながら内部構造を作るような複雑な系に対して、粒子系に基づく離散モデル(DEM-Discrete Element Method)と粒子系－連続体系カップリングモデルを構築し、大規模シミュレーションのための計算手法と技術を確立する。
- この手法を、幾つかの重要な応用問題(血流、高炉、地盤・岩盤、相転移・沸騰・爆発)に適用し、複雑多相系の現象の解明と解析、予測に役立てる。

# 本年度研究計画

1. **血流**: 昨年度までに、規定した流れ場における赤血球運動を再現する計算力学シミュレーションを地球シミュレータ上で展開するためのベクトル化・並列化の最適化を行い、128ノードを用いたプロダクションランに成功した。本年度は分岐血管などの複雑モデルを扱い、最終的な目標である3次元モデルへの拡張を行う。
2. **電子写真**: 電子写真システムの二成分現像方式における現像ローラ近傍の現像挙動について、従来のDEMに電磁気力を追加した3次元粒子挙動シミュレーションを実施する。
3. **高炉**: 前年度までのデータから粒子沈降モデルを構築する
4. **海底侵食**: 現象に関するデータ収集と基礎モデルを構築する。
5. **地盤・岩盤・プレート**: 4体粒子モデルQDEMで弾性固体と粘性流体のカップリングモデルを作りベクトル・パラレルチューニングを行う。

# 今年度得られた研究成果

サブテーマ	研究成果	備考
血流	3次元モデルのシミュレーション・膜回転などの1つの赤血球の複雑な動きや、集団運動効果が発現された。 2次元モデルの複雑系シミュレーション	ES 128ノード
電子写真	電磁場をカップリングさせたトナーとキャリアーの3次元モデルの構築	都合により変更
高炉	昨年度までの計算結果を元にした新しい粒子沈降速度予測式の確立	論文へ
海底侵食	乱泥流による海底侵食モデルに関する調査・基礎研究	
地盤・岩盤・プレート	QDEMによる弾性固体と粘性流体のカップリングモデルの作成及びベクトル化	

# 今年度までの達成度

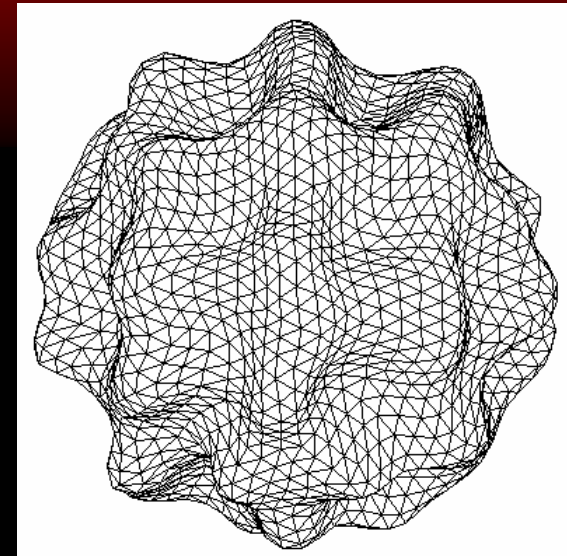
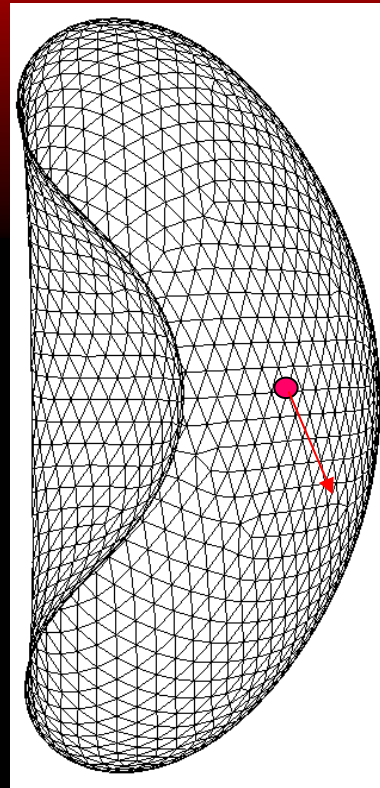
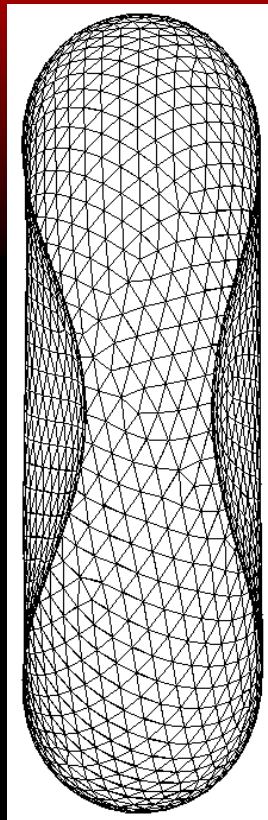
サブテーマ	基本モデル作成	コード作成	ES用の最適化・チューニング	ポストプロセッシングツールの構築	プロダクションラン
血流	◎	◎	◎	◎	◎
電子写真	◎	◎	予定変更	予定変更	予定変更
高炉	◎	◎	◎	◎	◎
海底侵食	◎	△	本年予定なし	本年予定なし	本年予定なし
地盤・岩盤・プレート	◎	◎	△	本年予定なし	本年予定なし

◎ : 完了  
 ○ : 完了間近  
 △ : 進行中

# 血流シミュレーション

(東北大学 和田成生・北川)

## 3次元赤血球の流動シミュレーション

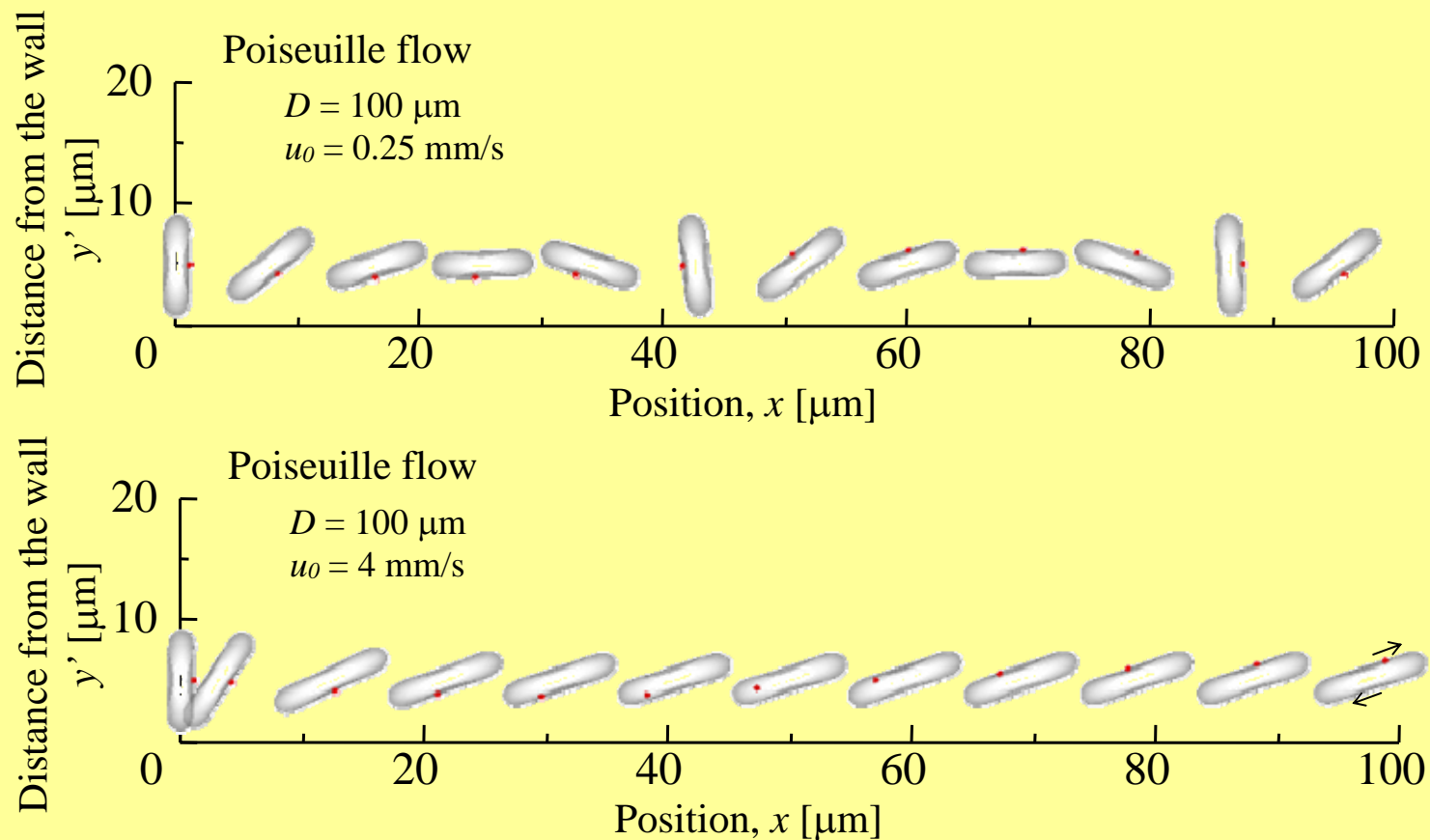


個々の赤血球はエネルギー最小化原理に基づく膜モデルで表現され、せん断力による膜回転も表現できるものを開発した。

# 血流シミュレーション

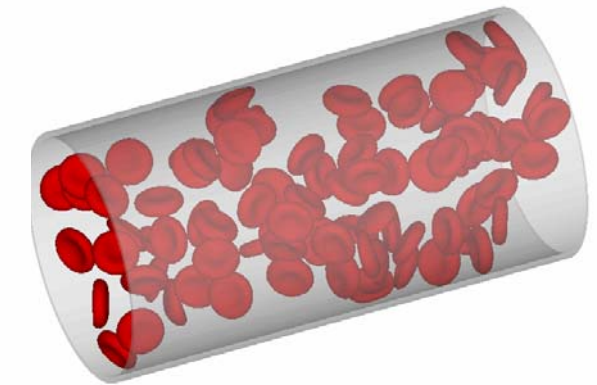
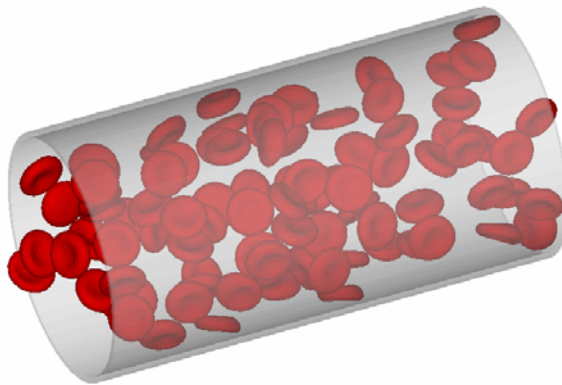
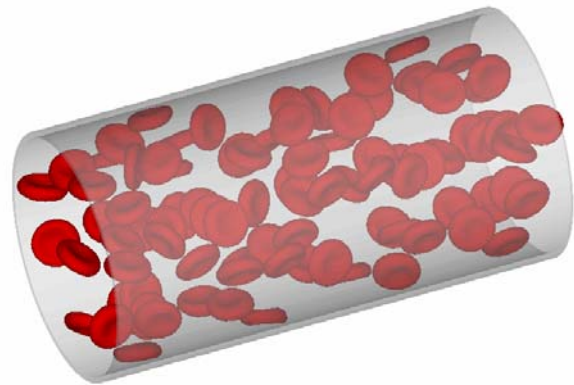
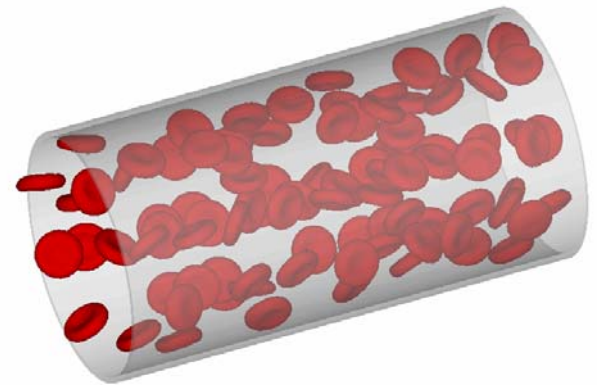
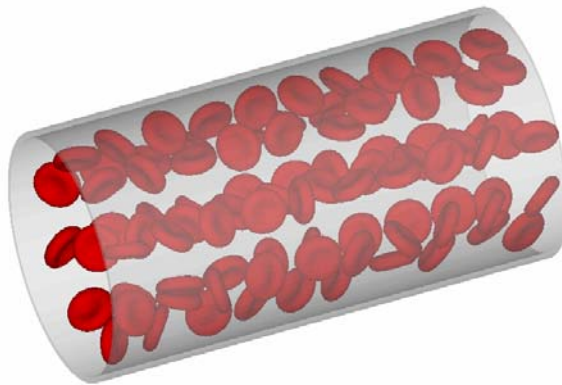
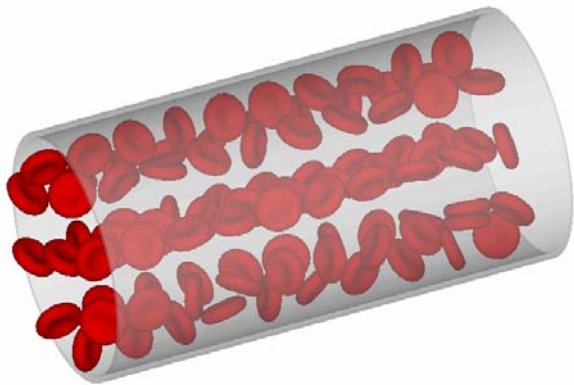
## 赤血球単体運動の厳密な再現

1. 膜の回転 (tank treading) と剛体回転 (tumbling)
2. 管軸方向への移動 (axial migration)



# 血流シミュレーション

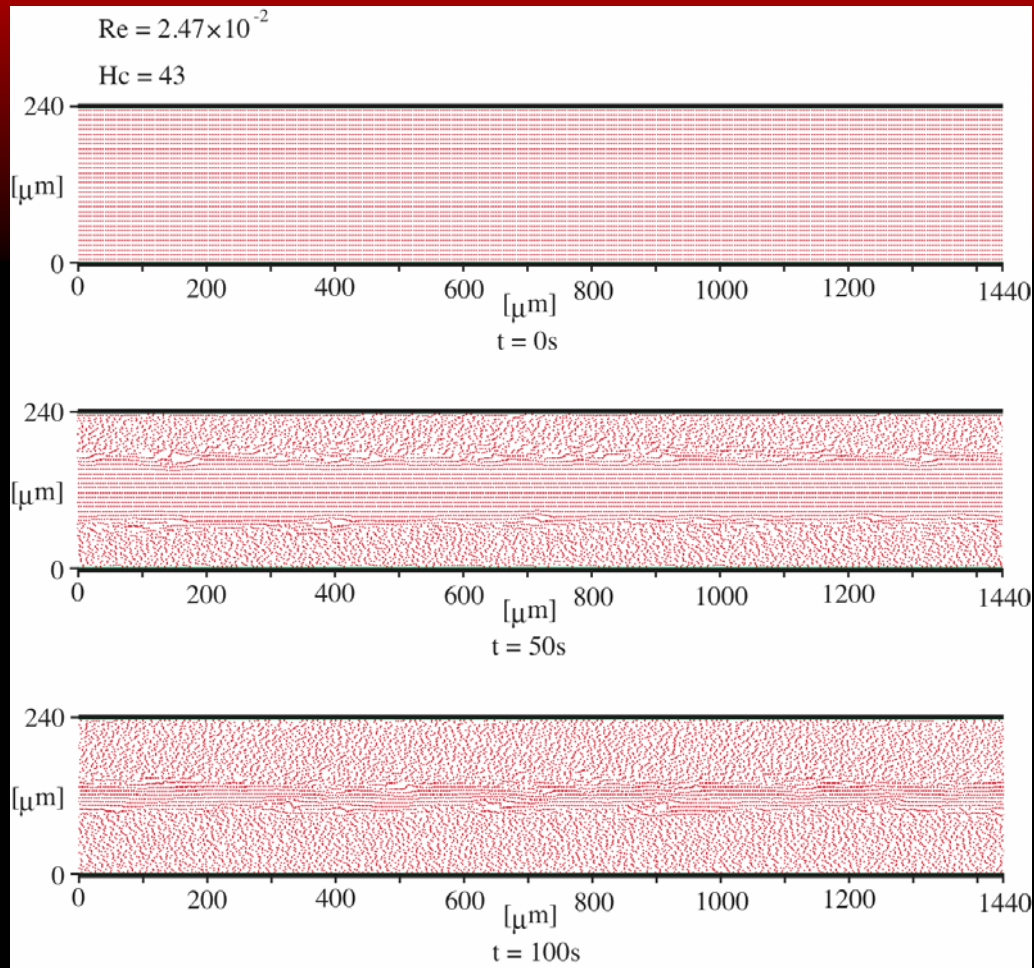
赤血球集団挙動の再現



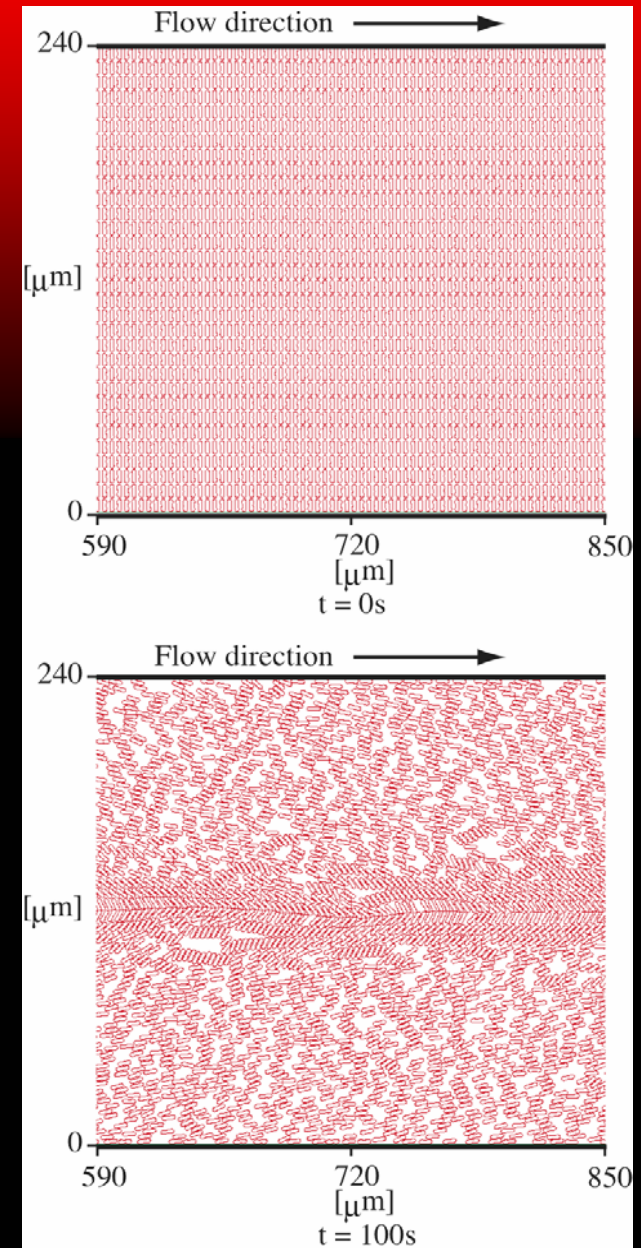
$d = 40 \mu\text{m}, u_o = 1 \text{ mm/s}$

# 血流シミュレーション

赤血球: 12,288個, 1024 CPU

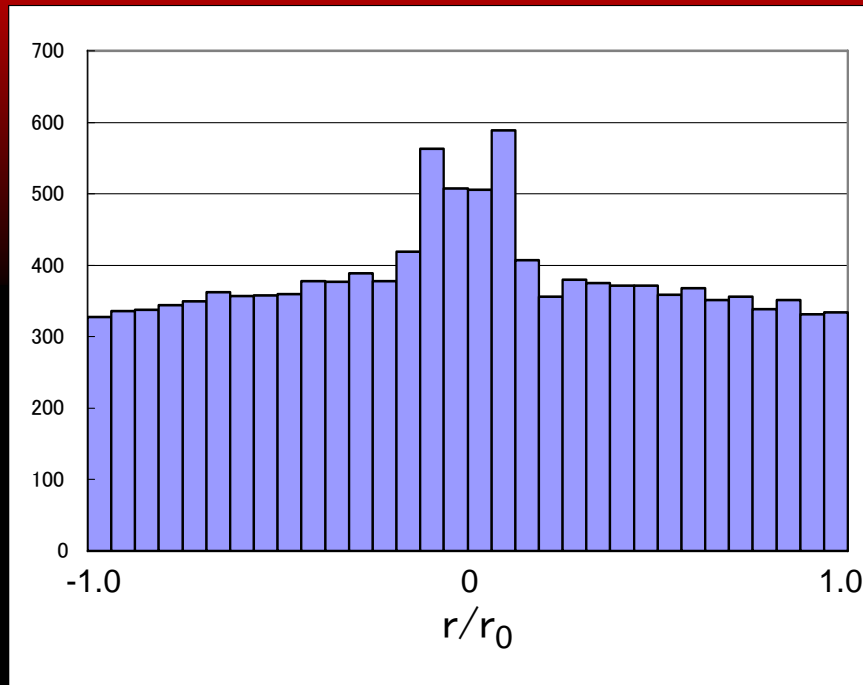


$d = 240 \mu\text{m}$ ,  $Hc = 43\%$

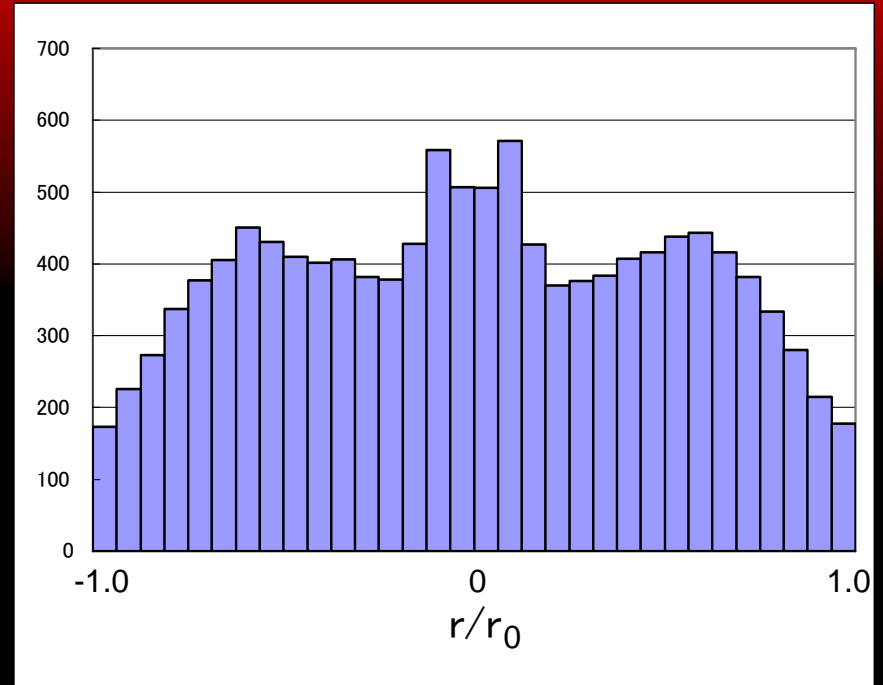


# 血流シミュレーション

(1) 血液の非ニュートン性を  
考慮しない流れ場 (Poiseuille Flow)



(2) 血液の非ニュートン性を  
考慮した流れ場



管壁近傍の赤血球数が減少している



実際に微小血管内において  
観察される現象と同じ傾向を示している

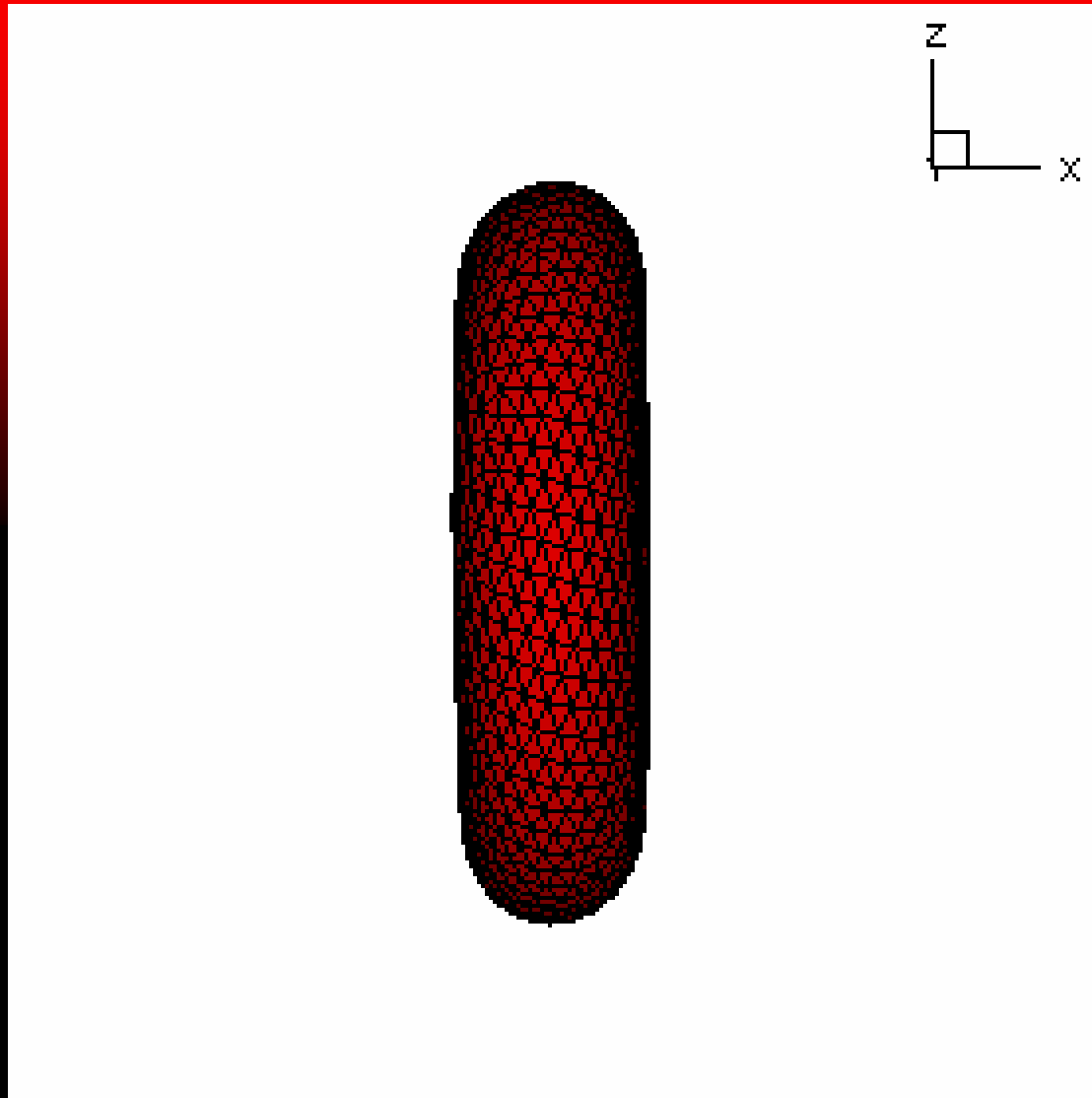
0.00000sec



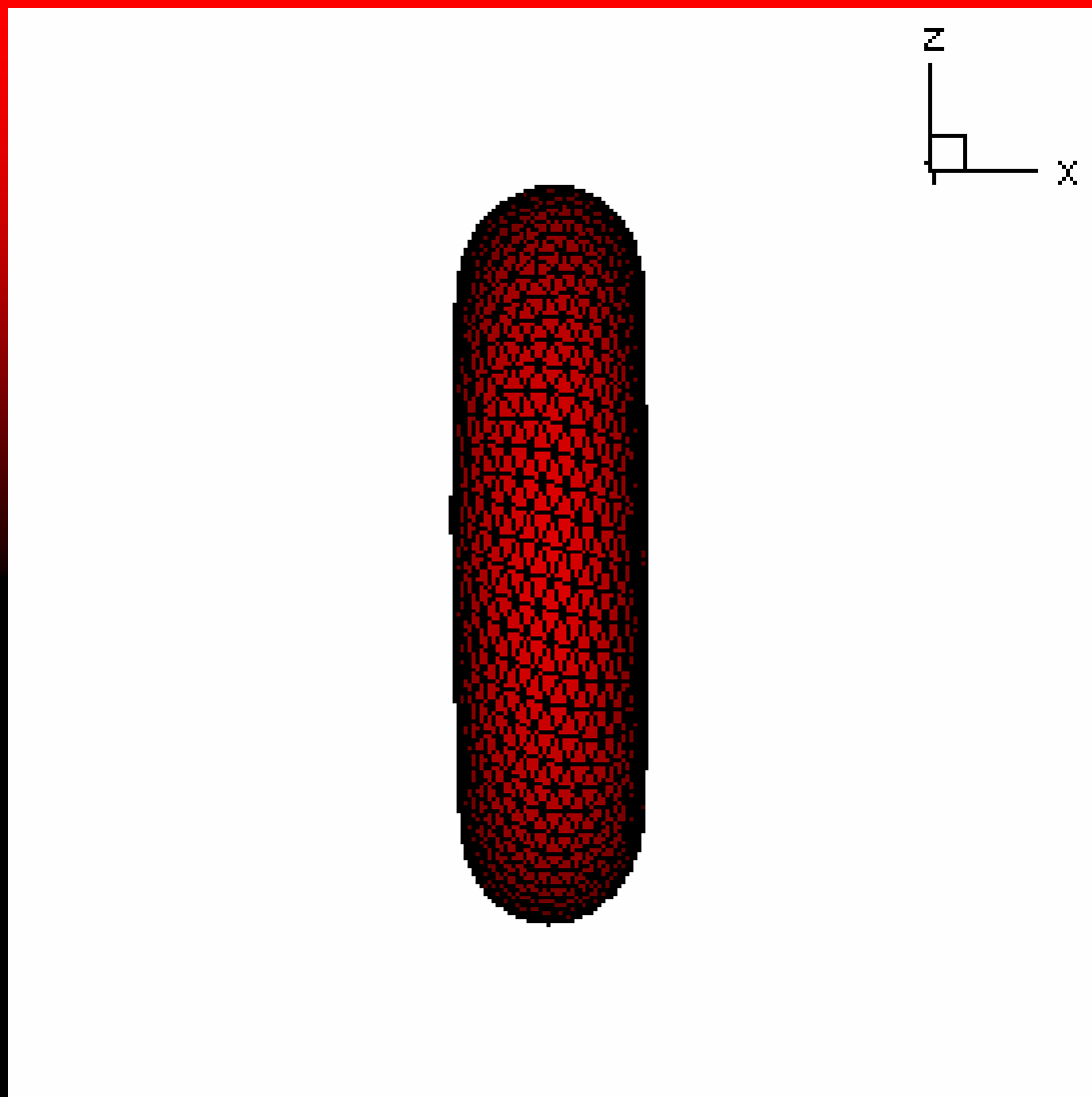
赤血球の変形



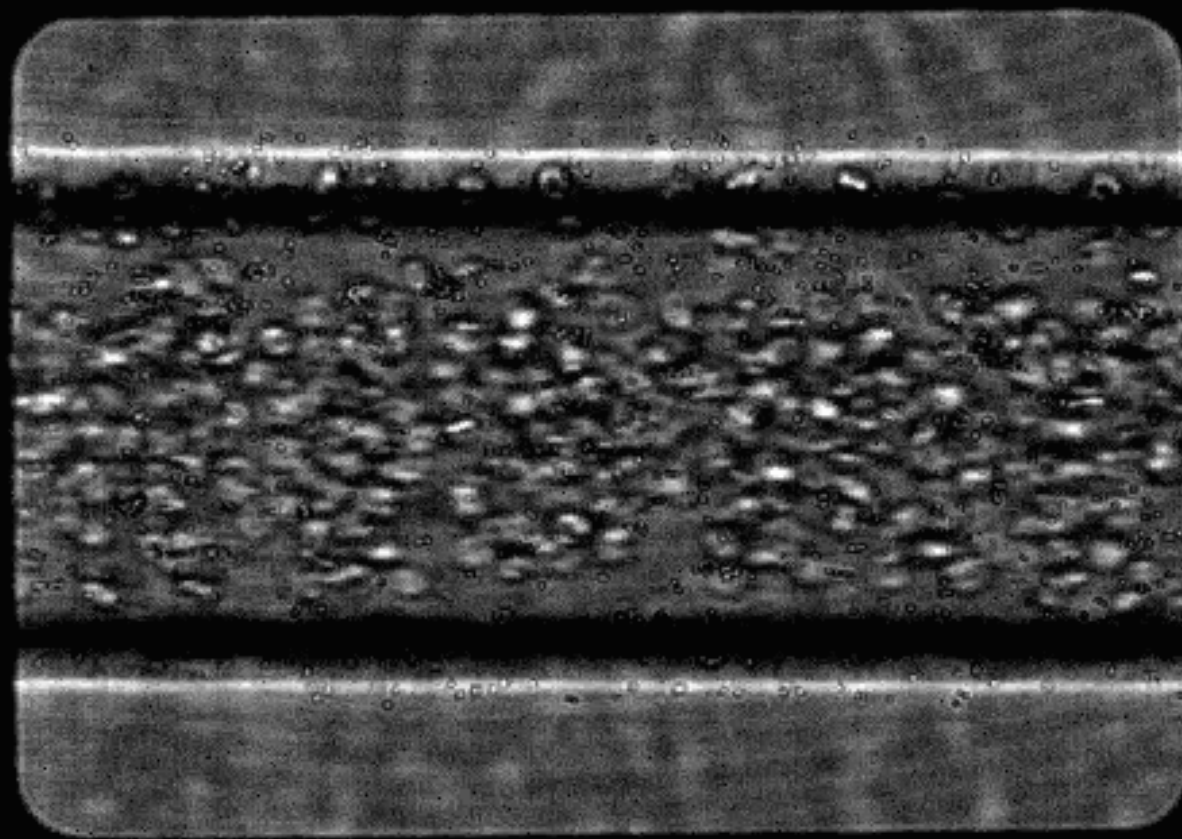
赤血球の毛細管への押し込み



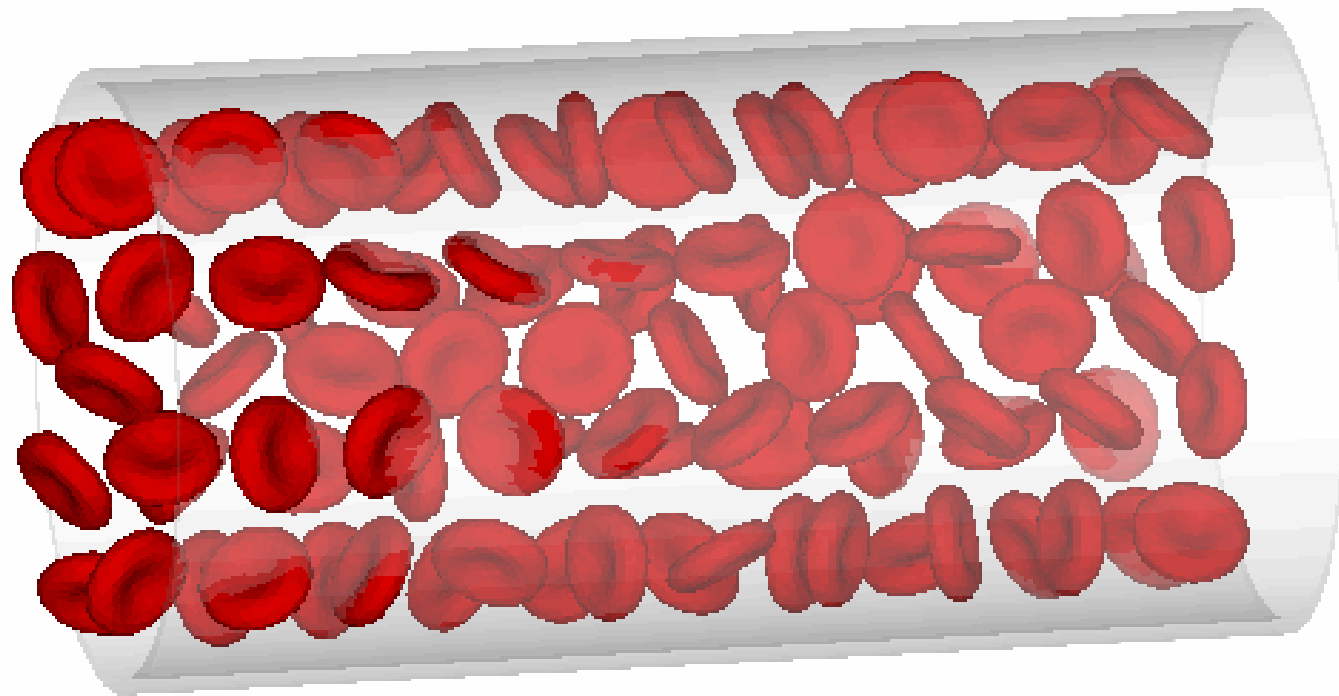
剛体回転に近い挙動(低せん断流)



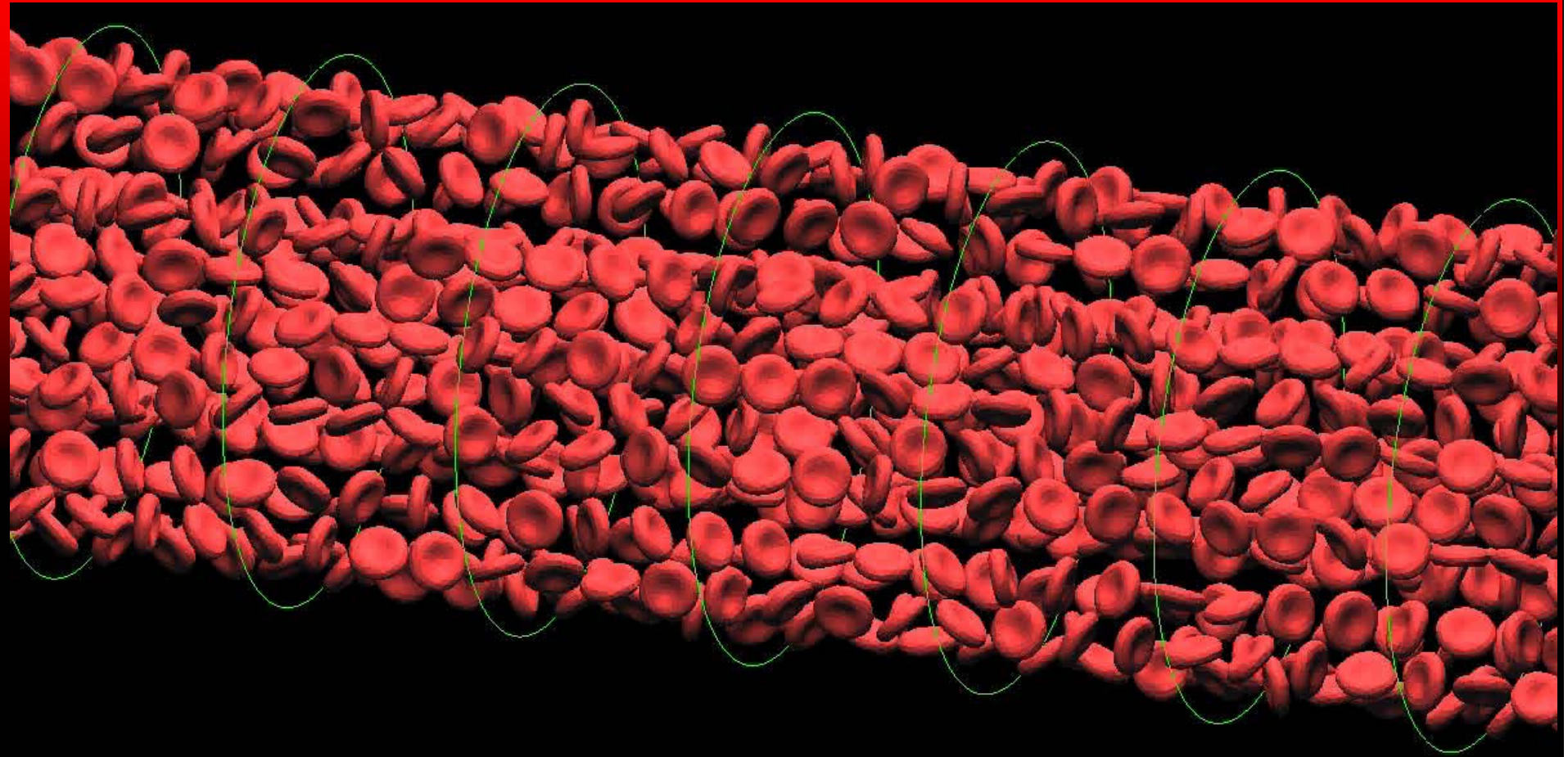
膜回転挙動(高せん断流)



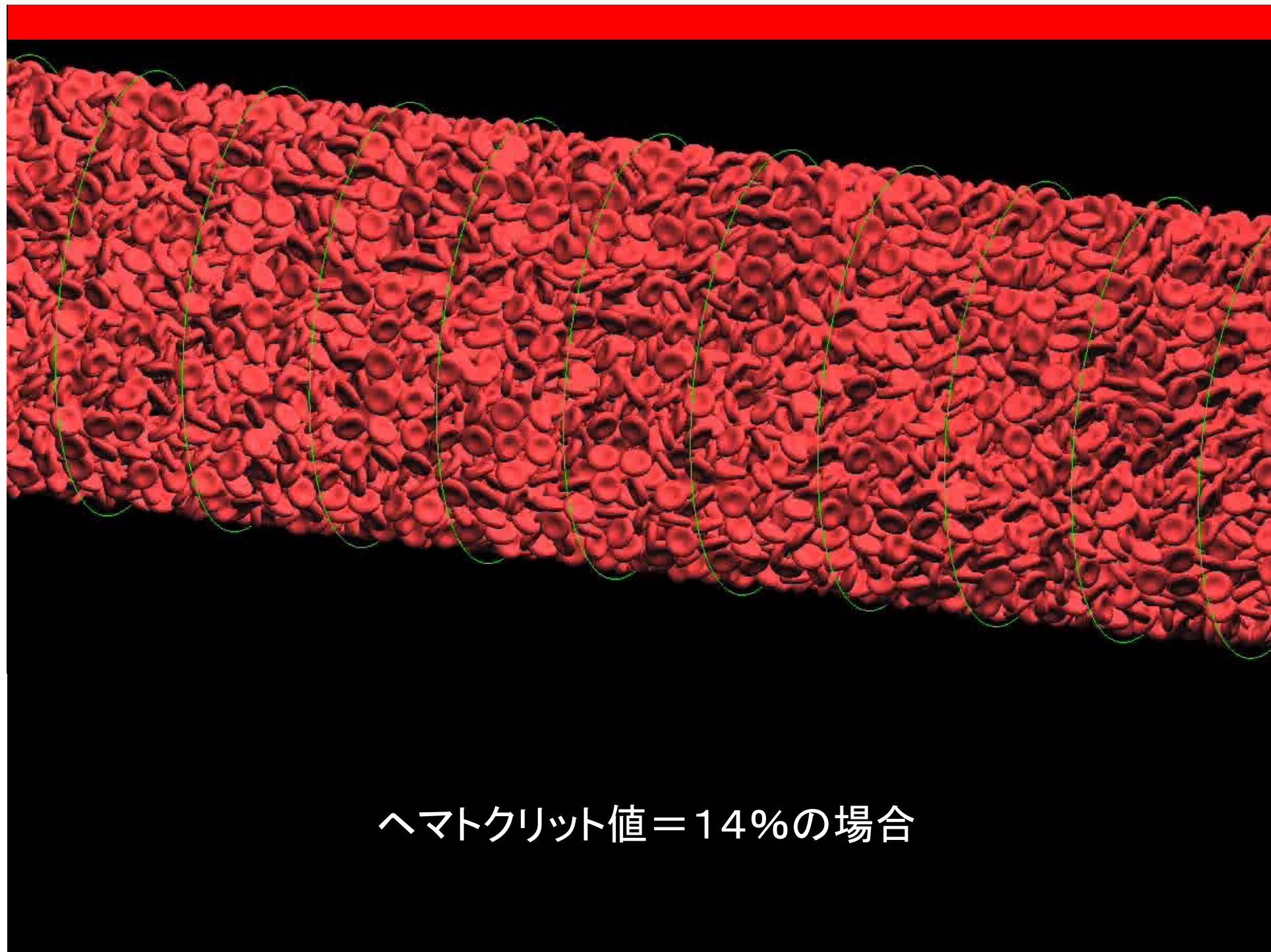
血流実験



3次元血流シミュレーション



ヘマトクリット値 = 7% の場合



ヘマトクリット値 = 14% の場合

# 次年度へ向けて

1. 血流： 3次元の複雑問題(分岐管、変形性血管など)に取り組む
2. 電子写真： 検討中
3. 高炉： 九州工業大学グループを中心に基礎研究から実問題へ発展させる
4. 海底侵食： 18年度深海底調査研究による実データを基に高炉シミュレーション技術(多数粒子の流体内沈降シミュレーション)を利用して、乱泥流シミュレーションに取り組む
5. 地盤・岩盤・プレート： 全球モデルに着手する