

DEMによる内部構造を持つ 複雑多相系の粒子モデル

プロジェクト責任者名

阪口 秀 (IFREE/JAMSTEC)

分担研究者

和田 成生 (大阪大学大学院基礎工学研究科)

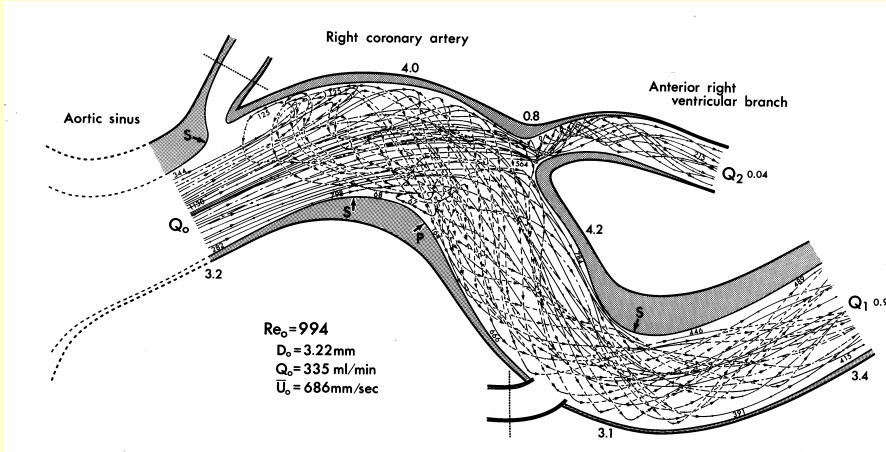
中村 匡徳 (大阪大学大学院基礎工学研究科)

今井 陽介 (東北大学大学院工学研究科)

背景

Multi-scale Blood Flow

Blood flow in coronary artery (Asakura & Karino, 1990)



Macroscopic scale

Fluid flow

Mesoscopic scale

Macroscopic flow
+
Microscopic cell behavior

Blood flow in capillary (Skalak, 1969)



Cell flow

Microscopic scale

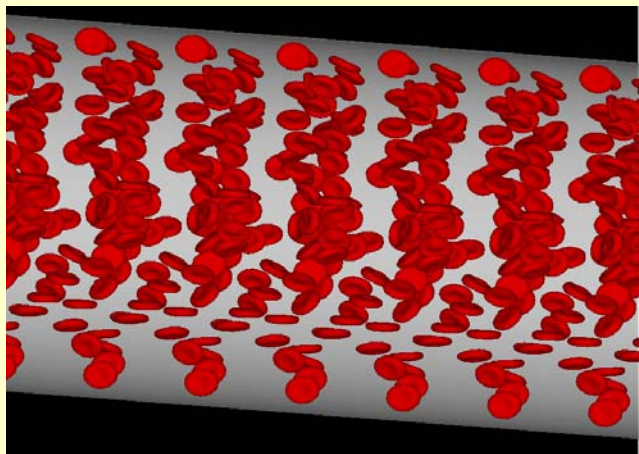
目的

粒子性物質が気相、液相、固相と**混在している場**で、**内部構造**を作りながら複雑な振る舞いを示す系に対して、**粒子系離散モデル** (DEM-Discrete Element Method)と**粒子系－連続体カップリングモデル**を構築し、**複雑多相系現象**の解明と解析、予測に役立てる。

血しょう＋血球	⇒	混相状態
赤血球の変形 赤血球の凝集	⇒	内部構造
個々の赤血球	⇒	離散的振舞い
血液全体	⇒	連続体的振舞い

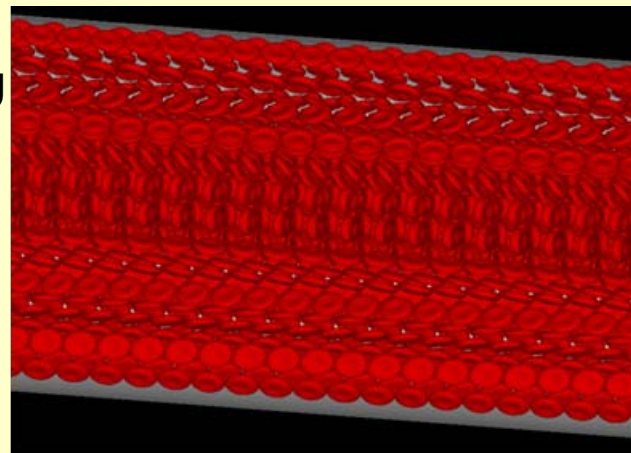
赤血球濃度の影響

2032個
128CPU
12hours



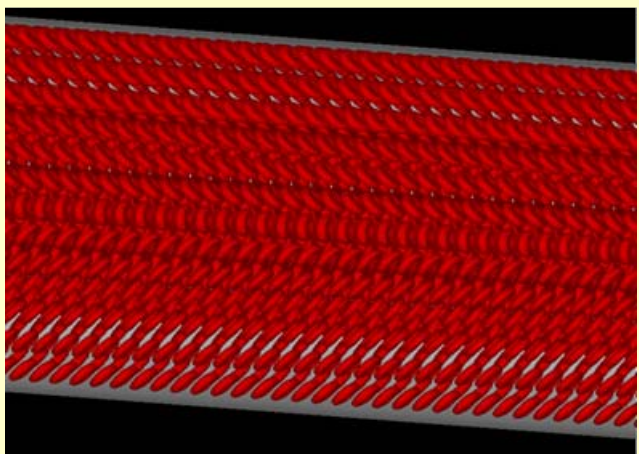
Hct 5% $t = 2.0$ s

8128個
256CPU
12hours



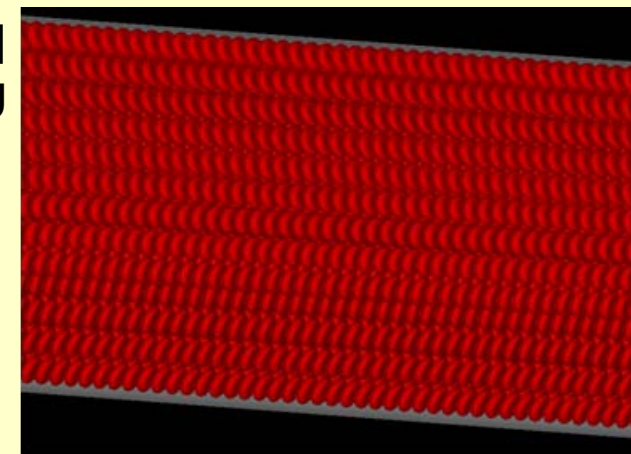
Hct 15% $t = 1.47$ s

12192個
256CPU
12hours



Hct 25% $t = 0.41$ s

16256個
256CPU
12hours



Hct 35% $t = 0.24$ s

ヘマトクリット5%, 15%, 25%, 35%の直円管内の赤血球流動挙動の比較した。
赤血球数が多くなると、初期配置の影響がなくなるまでにはかなりの計算時間を要する。

赤血球流動計算の現況

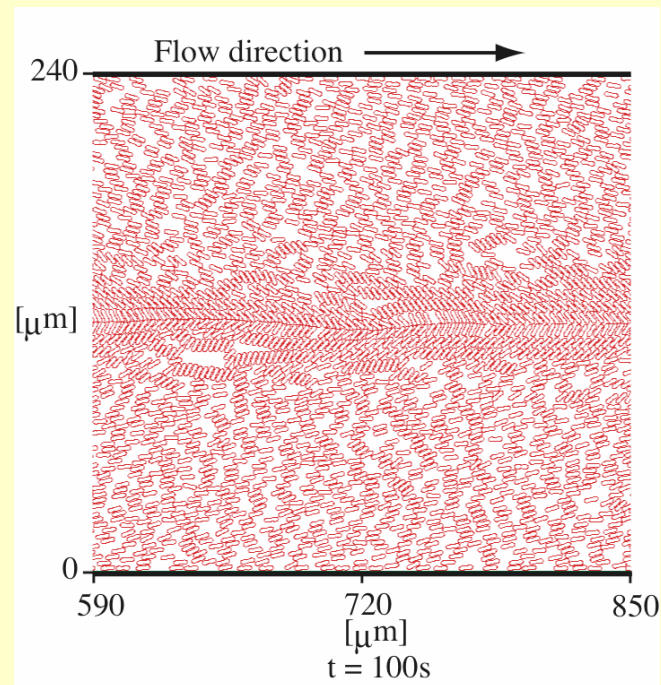
HCT (%)	# RBC/1cpu	time simulated /12hrs@ES [s]
5	15.88	2.01
15	31.75	1.47
25	47.63	0.41
35	63.50	0.24

大規模計算を行うために並列化を強化してきたが、
1 CPU当たりの計算速度を向上させる必要がある。



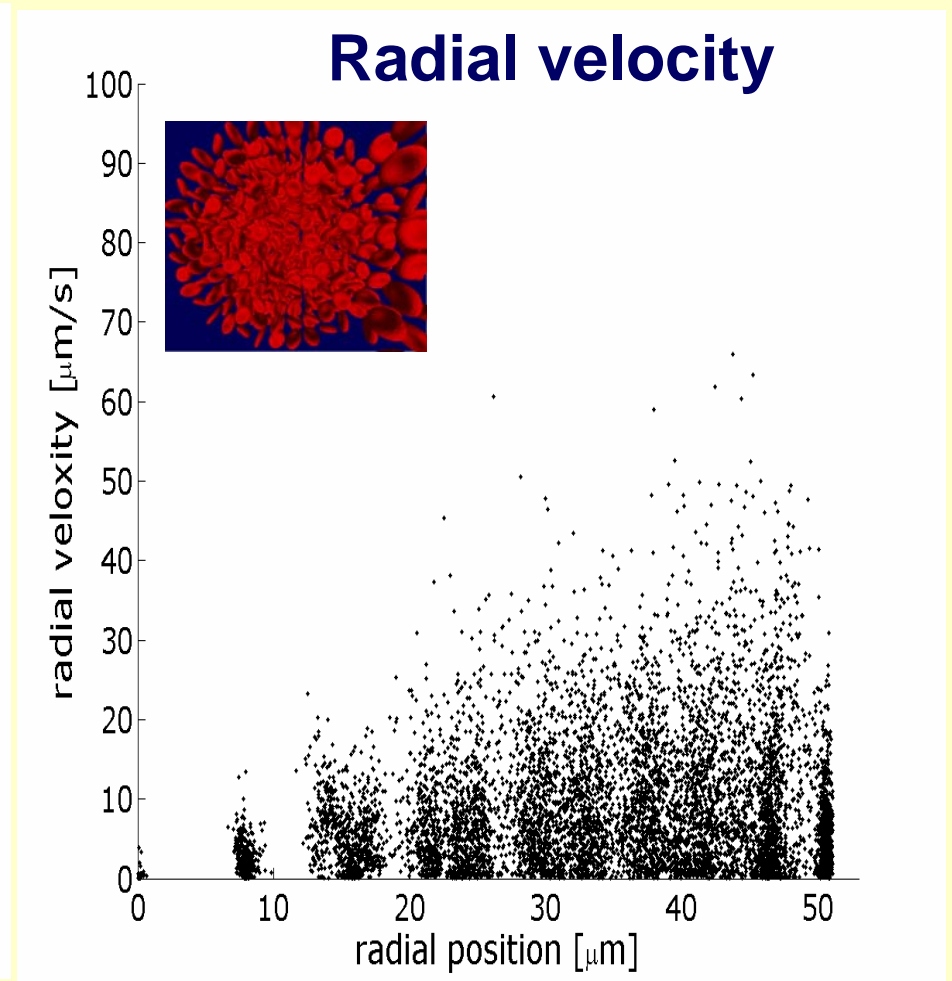
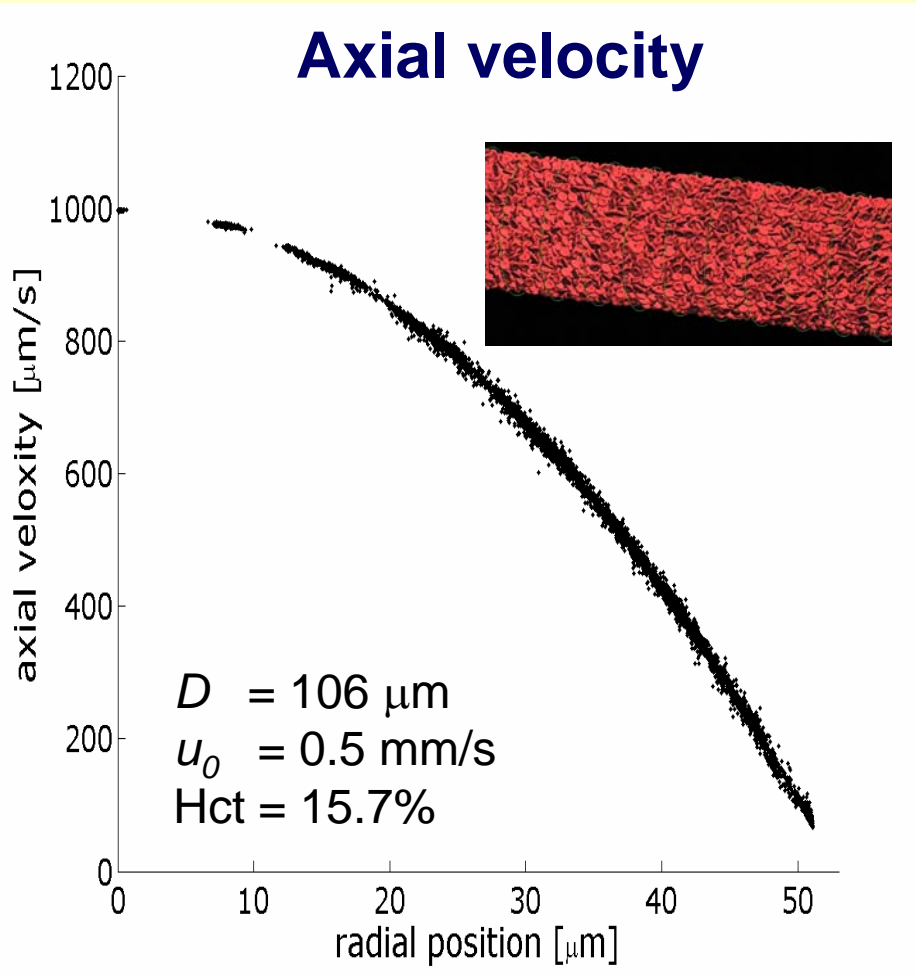
ベクトル化の強化

赤血球流動の可視化



これまで観察していなかった管中央断面の挙動を可視化した。2次元計算で得られたように(右図), 管軸中央では, 赤血球は流れに垂直に配向し, 規則的なパターンを形成して流れていることが分かった。

Fluctuation of RBC Velocity (Simulation)

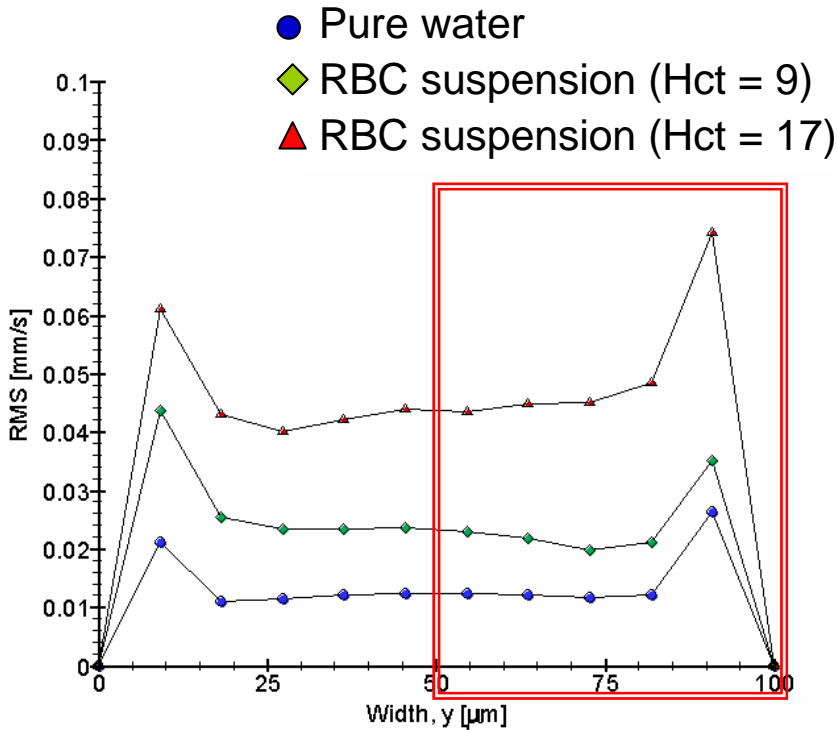


赤血球同士の力学的相互作用により、管壁に近づくほど血球速度のばらつきが大きくなることを明らかにした。

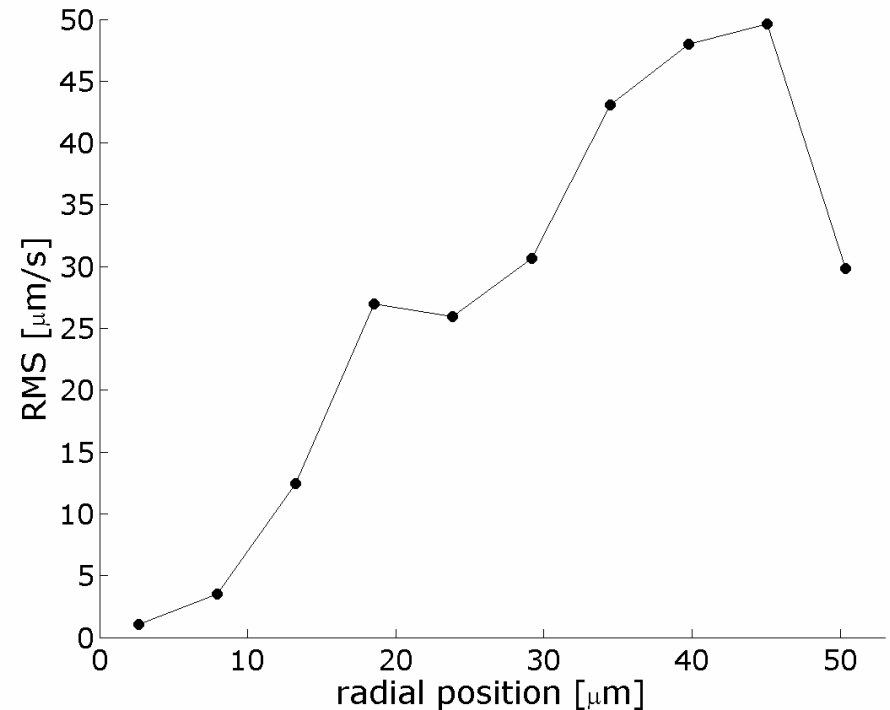
Comparison of the RMS Velocity

$W = 100 \mu\text{m}$
 $u_0 = 0.25 \text{ mm/s}$

$D = 106 \mu\text{m}$
 $u_0 = 0.5 \text{ mm/s}$
 $\text{Hct} = 15.7\%$



Experiment

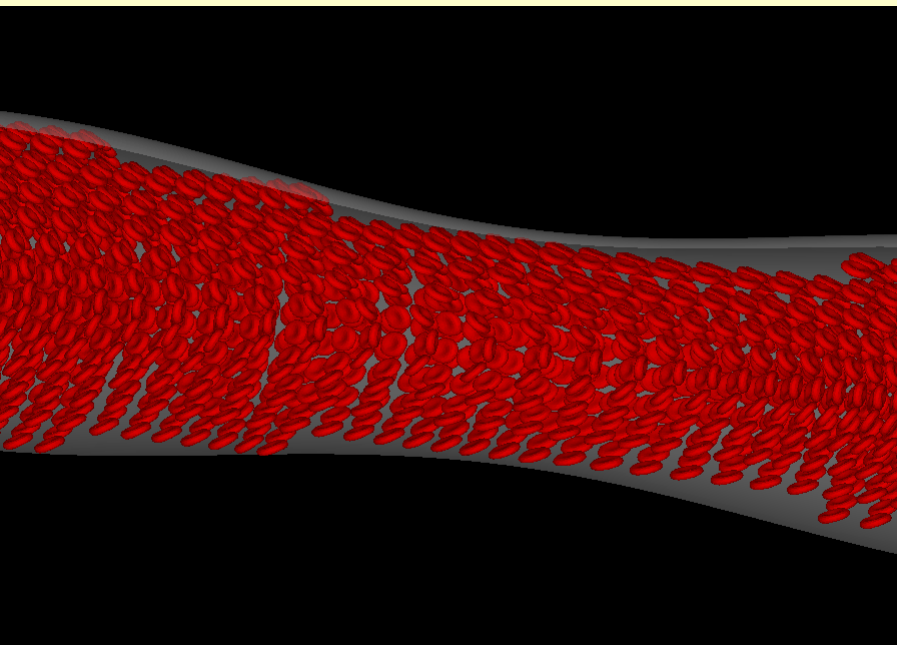


Simulation

共焦点マイクロPIVで計測した結果と比較し、シミュレーション結果の検証を行った。

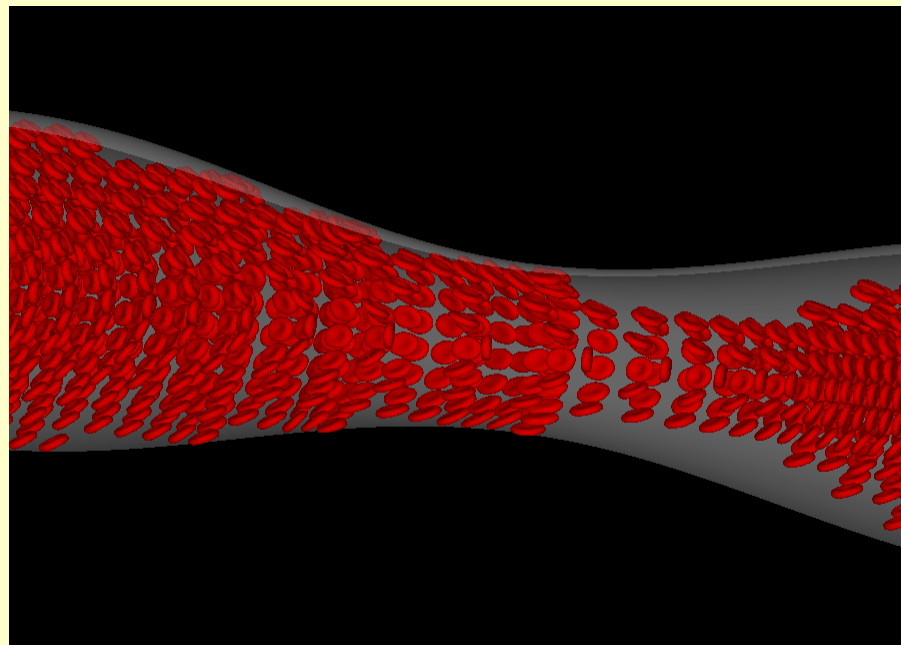
血管狭窄部の血球流動計算

ヘマトクリット15%,



狭窄率30%

6706個, 256CPU

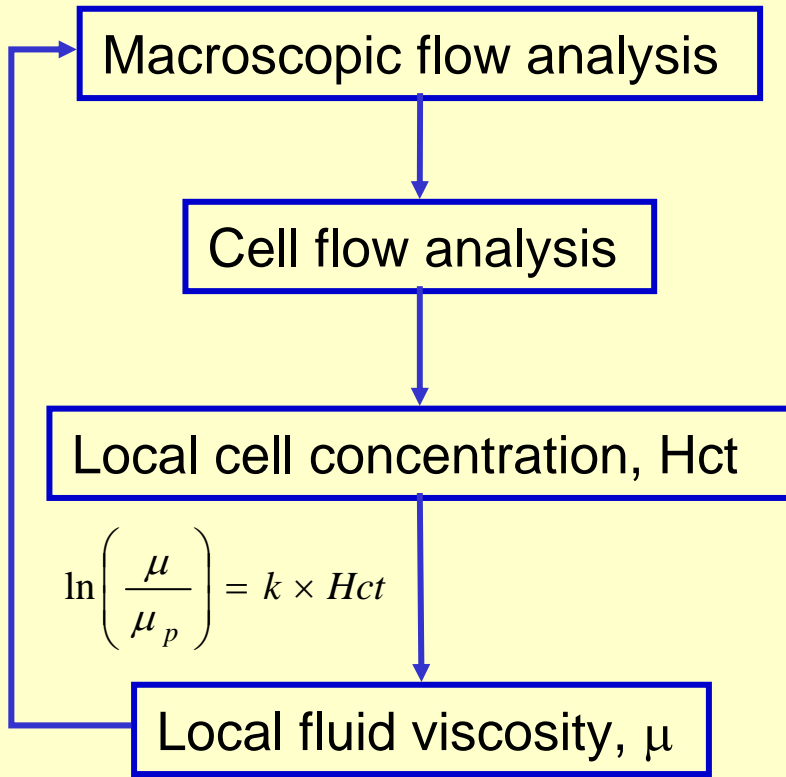


狭窄率50%

6150個, 256CPU

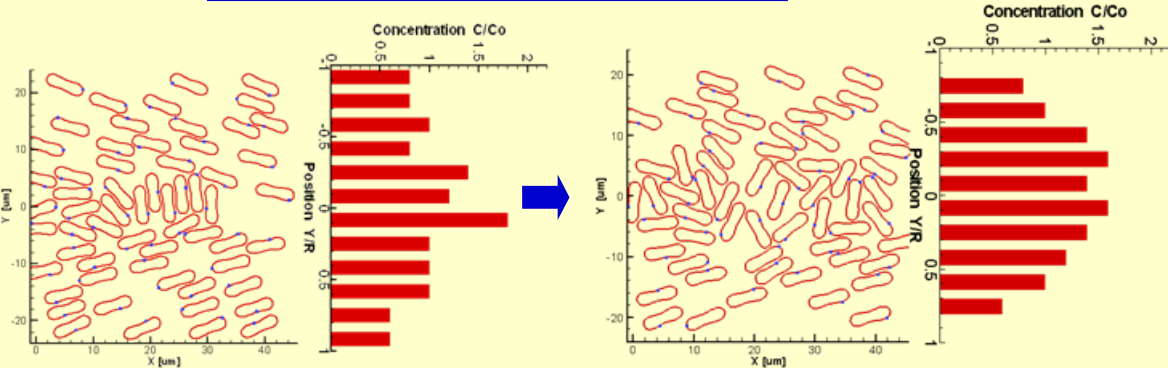
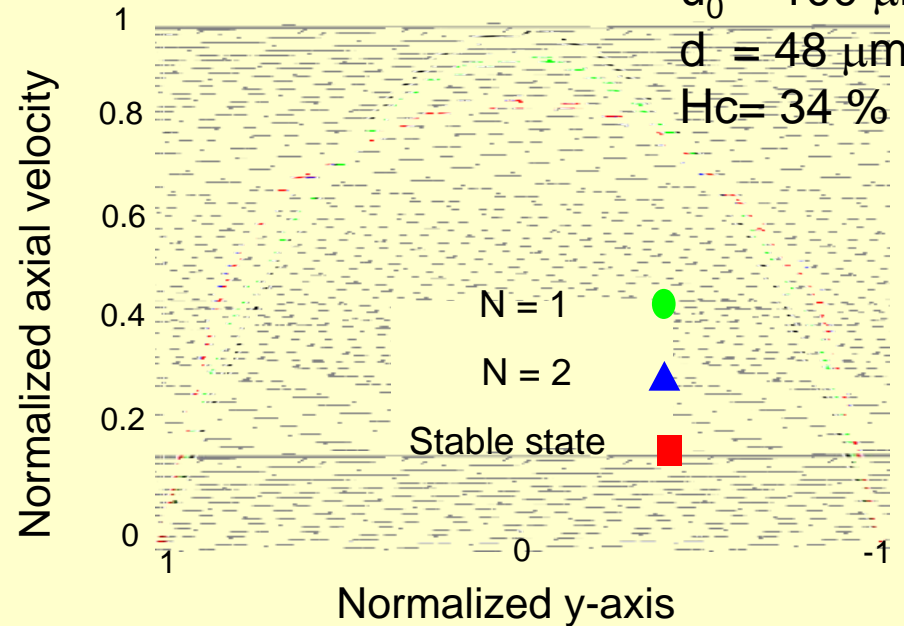
正常なヘマトクリットでも、流速変化によって瞬間的に高ヘマトクリットになる可能性が示唆された。

Multiscale Analysis of Blood Flow



Velocity profile

$Re = 0.005$
 $u_0 = 100 \mu\text{m/s}$
 $d = 48 \mu\text{m}$
 $Hc = 34\%$



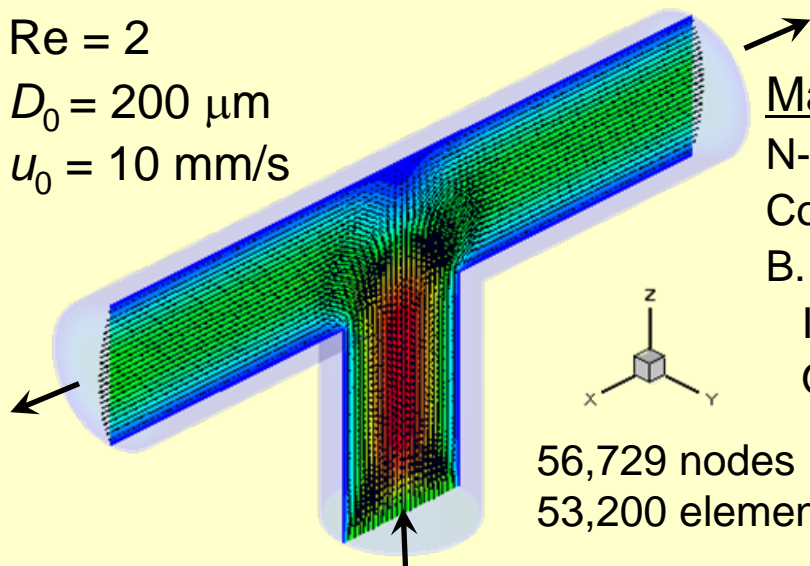
- 3次元モデルによる赤血球の集団挙動とマクロナな血液流れとの関係説明

溶血シミュレータへの応用

$$Re = 2$$

$$D_0 = 200 \mu\text{m}$$

$$u_0 = 10 \text{ mm/s}$$



Macroscopic flow field

N-S eq.

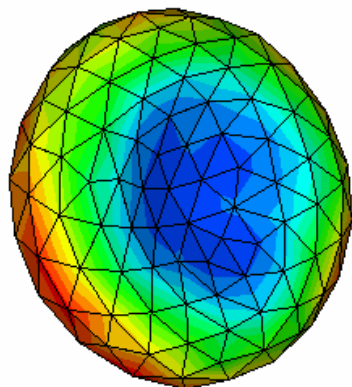
Continuity eq.

B. C.

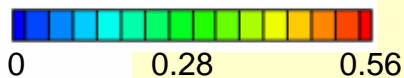
$$\text{In} : V = u_0$$

$$\text{Out} : P = 0$$

56,729 nodes
53,200 elements



Principal strain



- 溶血発生メカニズムの解明と新しい溶血指標の提案
- 心臓—大動脈の流れ場における赤血球流動挙動の解析