

機関番号：3 2 6 6 3

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：2 1 8 6 0 0 7 3

研究課題名(和文) ハイドロゲル表面および内部と周囲流体とのマイクロ干渉

研究課題名(英文) Micro interference among surface and inside of hydrogel, surround fluid

研究代表者

菊地 謙次 (KIKUCHI KENJI)

東洋大学・理工学部・助教

研究者番号：0 0 5 5 3 8 0 1

研究成果の概要(和文):本研究では,ハイドロゲル材料における親水性表面のごく表面における流れを,微小領域速度勾配計測法を用いて計測し,またゲル内部の水の挙動観察を行った.ゲル表面近傍ではすべり流れとなることが確認され,ゲルの含水量の増加に比例しすべり速度が増加し,反比例して壁面せん断応力が低下することが確認された.ゲル内部の水は,すべり流れに誘起され流動していることが確認され,ゲル表面の摩擦低減の可能性を見出した.

研究成果の概要(英文):The flow on a hydrogel surface was investigated for clarifying an effect of the surface flow to a living cell because the surface of a living cell resembles a hydrogel. The thin film-flow along the surface was measured by using a micro PIV (Particle Image Velocimetry) system. The flow near the hydrogel surface was slipped in our experiment. The magnitude of the slip related with the swelling degree and molecular weight of hydrogel materials. The slip flow on hydrogel surface was useful for the reduction of the wall shear stress because the decreasing of velocity gradient near the wall surface. It was worth observation that the slip flow near the surface induced the water flow inside the hydrogel.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	870,000	261,000	1,131,000
2010年度	720,000	216,000	936,000
総計	1,590,000	477,000	2,067,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学，表面・界面物性，バイオテクノロジー

### 1．研究開始当初の背景

生物の多くの体表面や体内は、水分とタンパク質により形成されたハイドロゲルによって構成されている。ゲルとは「あらゆる溶媒に不溶の三次元網目構造もつ高分子およびその膨潤体」と定義される物質であり、ハイドロゲルとは、溶媒が水であるゲルのことを指す。生体におけるハイドロゲルは、タンパク質が三次元の網目構造を構成し、水で膨潤した弾性物質である。固体表面における流体の流れは、基本的に統計的観点から流体の運動がない、すべりなし流れとなることが基礎流体力学で広く知られているが、ゲル表面および内部が周囲の流体の運動に与える影響を追及した研究はこれまで十分になされていない。

申請者の先行研究として、高出力密度のマイクロポンプ開発を目標として、既に超小型マイクロポンプを有する蚊の吸血機構に着目し、その吸血メカニズムの解明を行ってきた。特有のポンプ構造や出力を算出した結果、蚊の吸血ポンプは、既存の人工マイクロポンプより約 1000 分の 1 の大きさであるにもかかわらず、出力密度では同等の値を持つ高出力マイクロポンプであることが明らかとなった。この出力の算出には、吸血針内部の速度場計測から古典流体力学を基本とした固体表面上に負荷する摩擦係数に依存した算出方法を用いたため、出力の見積りに過剰・不足が考えられる。吸血に用いられる流路は、チキン質で構成されており、一般的な固体表面とは異なる材質だからである。生体材料と壁面せん断応力についての流体工学的な結論は現在議論されている議題である。

### 2．研究の目的

ハイドロゲル表面および内部の構造は、構成する分子と含有する水分に依存しており、表面における性状は、それらの含水率と表面上に分布する糖鎖によって異なる。ハイドロゲル表面における周囲流体は、その表面の分子構造を接触しており、せん断応力として作用し、そこで本研究では、ゲル表面近傍の速度場計測をすることによって、表面に作用するせん断力を計測し、周囲流体の運動とゲル内部の流体に与える影響を微視的に観察および評価することを目的とする。また、表面近傍における計測システムを構築し、その計測法の評価を行う。

### 3．研究の方法

本研究では、ハイドロゲル表面近傍の速度分布を計測し、ゲル表面に負担する壁面せん断応力を見積もり、固体表面など解析的に得られる壁面せん断応力を比較する。そのために、以下の 3 点について検証を行う。

#### (1)微小領域流速計測機を用いたハイドロゲル表面近傍の流れ場計測

固体平板、ハイドロゲル表面における液膜流れの計測を行う。ハイドロゲル上を流れる液膜水にマイクロ微粒子を懸濁させ、その粒子の挙動を高速度ビデオで撮影し、表面近傍の速度場計測 (PIV 計測) を行う。ハイドロゲルを形成するゲル材質や含水率を変化させ、その表面上の速度分布の結果を比較する。また、壁面ごく近傍の速度勾配より壁面に作用する壁面せん断応力を見積もり、それぞれ比較する。

(2)ハイドロゲルの三次元網目構造内における水の挙動の可視化

ハイドロゲルは、ゲル材料が内部で三次元網目構造を成し、水で膨潤された固体と液体の中間にあたる物質である。そのため、ハイドロゲル内部と周囲の水との関係は、基本的に物質、エネルギーの授受が自由にできる開放系となる。

ハイドロゲルの三次元網目構造内には、水分子が存在し、その構造内部を自由に運動できる。ハイドロゲル特有の構造におけるゲル内部の水分子が、周囲流体の運動から受ける挙動を調べる。この内部の水の運動を観察するために、微小領域におけるマイクロ LIF 法を利用し、可視化を行う。

(3)任意材料における壁面ごく近傍速度場計測システムの構築

顕微鏡とハイスピードカメラを用いた従来の微小領域流速計測装置では、壁面近傍の速度場計測をするためには壁面に対し水平方向から流れ場を観察する必要があった。このため、観察試料を加工し、傾斜流路の底面に取り付ける必要があるため、計測できる試料には限りがあり、また計測原理上空間分解能の限界があった。これらの問題点を解決すべく、任意材料の壁面近傍の速度場計測のための共焦点スキャナを搭載させた光断層微小流速計測機を構築する。

#### 4. 研究成果

(1)微小領域流速計測機を用いたハイドロゲル表面近傍の流れ場計測

傾斜流路上の液膜流れを側面から観察し、0.6mm の水膜内における流れの可視化装置を作成し、混入したマイクロ粒子の挙動から速度分布の計測を行った。図1は、アクリル表面に形成した液膜内部の速度分布計測結果である。アクリル表面の液膜流れでは、水

面近傍で最大流速を示し、底面部に近づくと流速は減少し、底面部では流速がゼロとなるすべりなし流れが観察された。

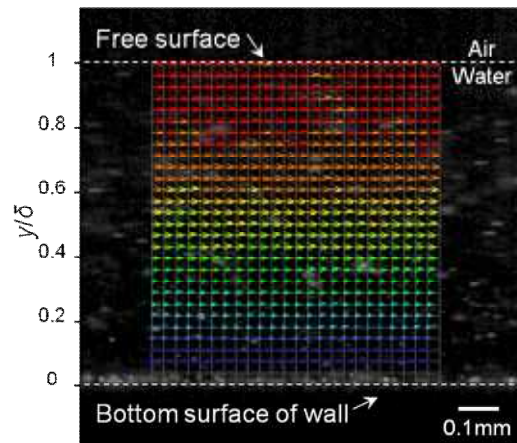


図1. PIV計測による壁面近傍の速度分布計測例（アクリル表面）

同様の手法を利用して、流量などの実験条件をそろえ、各種ハイドロゲル表面での液膜流れの可視化・速度分布計測を行った。その結果、ハイドロゲル表面上の液膜流れでは、アクリルなどの固体表面上と異なり、壁面上で流速を持つすべり流れとなることがわかった。ハイドロゲルの含水量、材料がそれぞれ異なる液膜流れでのすべり速度、壁面せん断応力を示したものを図2に示す。横軸は各種ハイドロゲルの含水量を示し、右軸に近づくほど含水量が増加する。また、左軸には、ハイドロゲル表面上でのすべり速度を棒グラフ示しており、右軸には速度勾配から見積もった赤面せん断応力をプロットで示している。含水量の異なるハイドロゲル上では、表面上でのすべり速度も異なり、ゲルの含水量に伴いすべり速度も増加する結果が得られた。この結果より、ハイドロゲルを形成する三次元網目構造の網目粗さが大きい（含水量が多い）ほど、すべり速度が大きくなること

がわかった。また、分子量の異なる2種類のハイドロゲル（寒天，カラギーナン）を比較すると、分子量の大きいハイドロゲル上でのすべり速度が増加する傾向が得られた。同体積で三次元網目構造を形成する場合、分子量が小さいゲル材量ほど密な構造体を形成することから、分子量が大きいゲル材量では同じ含水量でハイドロゲルを作成した場合、内部に形成された網目構造は分子量が小さいものより粗くなることが考えられる。本実験では、上述の仮定を満たす結果が得られ

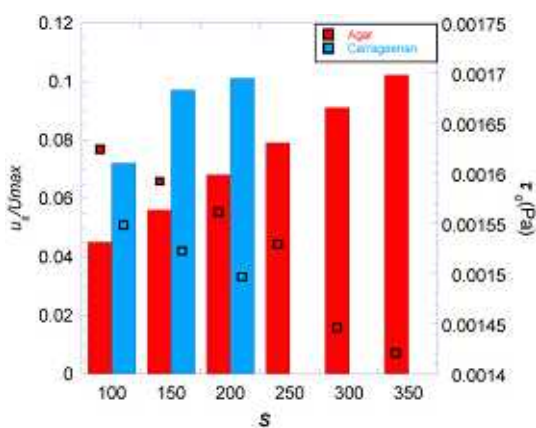


図2. 含水量およびゲル材料の異なるハイドロゲル上におけるすべり速度と壁面せん断応力との関係

ていることより、網目構造の粗さ（含水量とゲル材料の分子量に依存）とすべり速度には相関関係があることが示された。また、すべり速度の増加に伴い、壁面ごく近傍の速度勾配も変化し、壁面せん断応力は低下する傾向が得られた。これにより、ハイドロゲル表面では、すべり流れを形成することによって、壁面せん断応力を低下させ、摩擦抵抗を低減していることがわかった。

(2)ハイドロゲルの三次元網目構造内における水の挙動の可視化

ハイドロゲルは、周囲流体と内部の三次元構造体の水との物質・エネルギーの授受関係が開放系となるため、周囲もしくはゲル内部の

物質やエネルギーは基本的に自由に移動できる。エネルギーや濃度は、ポテンシャルの勾配に伴い物質・エネルギーは移動することから、周囲流体の移動に伴うゲル表面に作用する壁面せん断応力せん断力は、エネルギーとしてゲル内部へと伝達する。ゲル表面に蛍光染色材でマーキングし、一定条件で液膜流れにし、ゲル表面に壁面せん断応力を作用させた。その結果、ゲル内部にマーキングされた蛍光スポットは図3に示すよう、せん断力の作用する流れ方向に移動することがわかった。また、図4に示すようにゲルの含水量の異なる試料を用いて同様の実験を行った結果、含水量の多い試料程ゲル内部の水の移動量は大きくなった。これよりすべり速度の

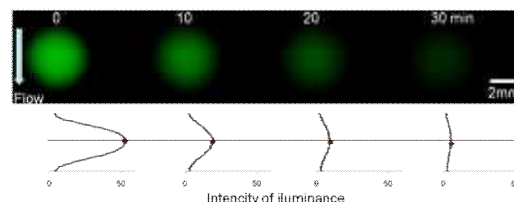


図3. ゲル内部にマーキングされた蛍光スポットとすべり流れ方向への移動

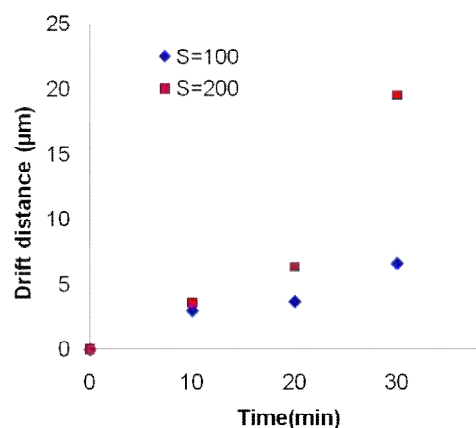


図4. 壁面せん断力を作用させたゲル内部の蛍光スポットの移動時間変化

が大きい（網目構造の粗い）試料ほど、ゲル内部の水の移動量も大きいことが示唆された。

(3)任意材料における壁面ごく近傍速度場計測システムの構築

顕微鏡と共焦点スキャナを用いて走査断面の速度場計測のできる壁面ごく近傍速度場計測システムの構築を行った。共焦点スキャナを図5のように顕微鏡が水平横置きになるように設置し、観察部を傾斜させることで、表面流れの三次元速度分布測定を行った。従来の微小領域速度場計測のように深さ方向の断面速度分布を順次取得して三次元速度分布とする時、壁面に垂直な奥行き分解能は計測断面の数で決まり、奥行き分解能は $2.3\mu\text{m}$ となる。一方、焦点面と壁面が平行ではなく平板が角度  $\theta$  傾斜し、焦点面と壁面とが $(90-\theta)^\circ$ だけ傾いた状態で速度場計測した場合、奥行きの分解能は速度計測での格子間隔に対応する壁面から垂直な奥行き方向の分解能 $\epsilon$ に置き換えると、 $\epsilon=0.47d \tan(90-\theta)=0.15\mu\text{m}$ となる。傾斜平面の液膜流れを本計測装置で流れ場を計測した結果、理論的に得られる流れ場と良好な一致を示した。さらに観察試料に対し垂直方向から観察できることから、任意材料での液膜流れの速度場計測を行え、かつ従来の計測空間分解能と比べ15倍改善された。

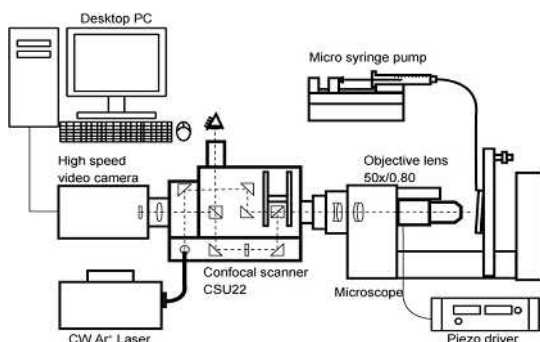


図5. 任意材料における壁面ごく近傍速度場計測システム

#### 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2件)

1. K. Kikuchi and O. Mochizuki, Micro-PIV visualization of red blood cell

(RBCs) sucked by a female mosquito, Measurement Science and Technology, 査読有, Vol.22, 2011, pp.1-9

2. K. Kikuchi and O. Mochizuki, Consideration of thrust in escaping motion of a mosquito larva, Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, 査読有, Vol.1, 2011, pp.111-116

[学会発表](計7件)

1. 菊地謙次, 蚊の吸血機構の吸血検査システムへの応用, 東洋大学共生ロボット研究センター公開シンポジウム 2010年12月11日, 東洋大学(川越)

2. K. Kikuchi, O. Mochizuki, Flow on a Hydrogel mimicked a surface of living cell, 21th International Symposium on Transport Phenomena, 2010年11月3日, Garden Villa Kaohsiung(Taiwan)

3. 菊地謙次, 住田庸亮, 望月修, 植物細胞におけるオルガネラ周りの流れ, 可視化情報学会全国大会 2010, 2010年10月7日, 霧島市国分シビックセンター(鹿児島)

4. 菊地謙次, 望月修, カエル皮膚表面上の流れ, 流体力学会年会 2010, 2010年9月9日, 北海道大学(札幌)

5. 菊地謙次, 望月修, 生体表面を模擬したハイドロゲル上の流れ, 機械学会年次大会 2010, 2010年9月7日, 名古屋工業大学(名古屋)

6. 菊地謙次, 望月修, 土中におけるすきまの流れ, 可視化情報学会可視化情報シンポジウム 2010, 2010年7月20日, 工学院大学(新宿)

7. K. Kikuchi and O. Mochizuki, Visualization of RBC sucked by female mosquito, 14th International Symposium on Flow Visualization, 2010年6月21日, EXCO(Tegu)

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

菊地 謙次 (KIKUCHI KENJI)

東洋大学・理工学部・助教

研究者番号：00553801

##### (2)研究分担者(0)

##### (3)連携研究者(0)

##### (4)研究協力者

望月 修 (MOCHIZUKI OSAMU)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：50157830