1 傾斜管内の赤血球沈降に伴う血漿の流れ

国立循環器病センター 研究所 新見 英 幸、山口 三 郎

PLASMA FLOW INDUCED BY ERYTHROCYTE SEDIMENTATION IN INCLINED TUBES

Hideyuki NIIMI and Saburo YAMAGUCHI

It has been recognized since Boycott (1920) that erythrocyte sedimentation rate is significantly increased in inclined tubes. To fully understand the enhanced settling process, microscopic observation was made of the motion of erythrocyte-Ringer suspension under gravity settling in two inclined tubes (straight and kinked). Polystyrene particles of approximately $1\ \mu\text{m}$ diameter were put into the suspension to visualize the motion of the fluid (Ringer solution) under microscope-TV camera.

A thin layer of cell-free fluid was observed underneath the downward-facing surface of the two tubes, in which strong up-flow was induced. The sedimentation rate and the thickness of the cell-free layer were measured for angles of inclination in the straight tube. Both of them were increased with increase in tube inclination up to 45 degree. This strongly suggests that the enhanced sedimentation rate may be closely connected with the cell-free layer near the inclined wall. The inclined settling process was discussed from a stand-point of two-phase fluid-dynamics.

1. はじめに

血液中の赤血球はその密度が血漿（媒質）より大きいので、重力を受け沈降する。この現象は古くから知られ、今日、臨床診断の簡便かつ有力な手段として、赤血球沈降速度（ESR）の検査が広く利用されている（1）。

管内の血液沈降に関する特異な現象の一つは、管壁を傾けると赤血球の沈降速度が著しく促進される事である（2）。この沈降促進因子は“Boycott effect”と呼ばれ、生理学のほか化学工学の分野に於いても重要となっている（3, 4, 5）。傾斜管内の血液沈

降現象に関して、従来多く研究されてきたが、そのメカニズムなど明かでない点も多い。

本研究では、赤血球沈降促進のメカニズムを理解する為、傾斜管内の赤血球サスペンションの運動を顕微鏡下で観察した。polystyrene 粒子をサスペンションに混入することにより媒質の運動を可視化した。赤血球の沈降状態の顕微鏡可視化法から、定量的分析を行ない、傾斜沈降過程を流体力学的に説明することを試みた。

2. 方法

2-1. 赤血球サスペンション

イヌからヘパリンナトリウムを添加・採取した血液を用いた。赤血球凝集による影響を除去する為、血漿及びパuffy・コートを取り除き、これを燐酸リンゲル液（比重 1.006 PH 7.0）にサスペンドさせた。この際、約 $1\ \mu\text{m}$ サイズのラテックス粒子を極く少量混入させた。赤血球サスペンションの体積分率（ヘマトクリット）を約 20% に調整したものを主に用いた。

2-2. 沈降管

内径 2.40 mm の透明ガラスから作成した 2 種類の沈降管（直管、折曲管）を用い、ガラスと同じ屈折率（1.4）をもつグリセリン溶液に浮かべた（図 1 (A)、(B)）。赤血球サスペンションを約 16 cm の長さまで注入し、傾斜角を段階的に変えた。実験は室温（約 20℃）で行なった。

2-3. 観察分析

観察に用いた実験装置を図 2 に示した。

沈降管を回転ステージに取付け、赤血球サスペンションの沈降経過を実体顕微鏡（Wild製）を用い拡大し、これをカラーTVカメラビデオに観察・記録した。（照明はタングステンランプを用いた）。像は顕微鏡で 6 ~ 25 倍、TV モニター上で約 50 ~ 200 倍拡大される。別に 16 mm シネカメラで微速撮影（主に 1 秒 1 コマ）を行なった。

Fig. 1 Schematic view of inclined tubes: straight (A) and kinked (B).

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus for visualization of erythrocyte suspension under gravity settling in inclined tubes.

ビデオレコーダーあるいは 16 mm シネフィルムから赤血球沈降の画像解析を行なった。特に、管内上層に生じるの媒質層の高さ、管壁近傍に生じる（血球を含まない）媒質層の厚みを詳しく調べた。

3. 結果

3-1、赤血球沈降曲線

赤血球の沈降には媒質の上昇が伴い、管内上部に（赤血球を含まない）媒質層が生じる。図 3 に管 (A), (B) に於ける媒質層の写真を示した。媒質層と赤血球サスペンションの境界面はほぼ水平で明瞭であった。

Fig. 3 Photographs of inclined settling of erythrocyte on the TV-monitor.

Fig. 4 Sedimentation curves of erythrocyte-Ringer suspension (cell concentration of 21%) in the straight tube (vertical and 45° inclined) and the kinked tube.

体積分率 21% の赤血球サスペンションの直管（傾斜角 45° ）および折曲管に於ける媒質層の時間的变化を図 4 に示した。比較の為、鉛直管に於ける沈降曲線もプロットしている。いずれも、沈降は時間に比例し増加するが、その時間勾配、すなわち沈降速度は異なる。傾斜管、曲折管の沈降速度は鉛直管と比べて著しく大きいこと、さらに、曲折管の沈降速度は傾斜管ほどではないこと、等は興味深い。

3-2、傾斜媒質層

傾斜管の下向き管壁の近傍には、赤血球を含まない媒質層が生じる。図 5 に傾斜管壁近傍に生じた媒質層の顕微鏡写真、及びその模型図を示した。この媒質層は、沈降初期を除き、ほぼ定常的に存在した。また、この薄い層内に強い上昇流が誘起されているのが観察された。傾斜管内の沈降の促進はこの媒質層の存在に密接に関係している。

(a)

(b)

(c)

Fig.5 Interface of cell-free layer and erythrocyte suspension in the inclined tube. Photographed directly from the microscope (a) and from the TV-monitor (c). Schematic drawing of the cell-free layer beneath the down-facing surface (b).

3-3. 傾斜角依存性

赤血球沈降は管の傾斜角に大きく影響される。図6に赤血球サスペンションの（体積分率21%）沈降速度（SR）と傾斜媒質層の厚み（CFT）が傾斜角を変えるとどの様に変化するかを示した。測定範囲以内ではSRのみならずCFTも、傾斜角の増加と共に増加していることは特に注目される。

4. 考察

赤血球の沈降速度（ESR）は赤血球の形状、比重など多くの因子の影響を受ける。血液の沈降現象は、一般に加速（沈降）期、等速期、減速期に分けられるが、これは赤血球の凝集（連鎖状形成）と管底への堆積に基因する。我々は血漿の代りにリンゲル液を用い、赤血球の凝集を防いでいるので、沈降曲線（図4）はほぼ直線になっている。（管底への赤血球堆積はこの測定時間内は少ない）。

赤血球の体積分率（ヘマトクリット）は沈降現象に大きな影響を与える。事実、ヘマ

トクリットが増加すると、沈降速度は増大する（3）。ある程度以上の高いヘマトクリットに対しては、共通の沈降過程を経ると考えられるので、本実験では約20%ヘマトクリットのサスペンションを主として用いた。

傾斜管内の赤血球サスペンションとそれから分離した媒質（リンゲル液）の流れを可視化することから、赤血球沈降過程の観察分析を行なった。図5に示した様に、傾斜管の下向き管壁の下側に媒質層が生じるが、この薄い層を媒質は約1mm/secもの速い速度で上昇する。そして、この媒質は最終的に管内サスペンションの上側に流れ込む。

このような沈降過程は（比重の異なる）微粒子を含むサスペンションに普遍的なものである（4、5）。沈降を支配する重要なパラメーターは、沈降の Reynolds 数 R , Grashof 数 G （あるいはその組合わせ $\Lambda = G/R$ ）

$$R = \frac{2\rho_m u_0}{\mu}$$

$$G = \frac{2^2 g \rho_m (\rho_p - \rho_m) c}{\mu^2}$$

Fig. 6 The sedimentation ratio and the thickness of cell-free layer measured with angles of the tube inclination.

但し、 l は 管 の な が さ、 ρ_m, ρ_p は 媒 質、サ
ス ペ ン ド 粒 子 の 比 重、 μ は 媒 質 の 粘 度、 g は
重 力 加 速 度、 c は 粒 子 体 積 分 率 で あ る。ま た、
 u_0 は 粒 子 の 無 限 媒 質 内 の 沈 降 速 度 で あ る。
我 々 の 実 験 で は $R = 3 \times 10^{-2}$, $G = 9 \times 10^6$,
 $\Lambda = 3 \times 10^8$ ($u_0 = 2 \times 10^{-5}$ mm/sec) と な る。

図 6 から 傾 斜 管 の 沈 降 速 度 (SR) は 傾
斜 角 の 増 加 と 共 に 増 加 し て い る。こ の 変 化 に
は 傾 斜 管 壁 に 生 じ る 媒 質 の 上 昇 流 が 密 接 に 関
連 し て お り、事 実、そ の 厚 み は 傾 斜 角 の 増 加
と 共 に 増 加 し て い る。詳 しい 解 析 (6) に よ
る と、 SR 、媒 質 の 厚 み δ は

$$SR \propto (\sin\theta + \phi_1)^{1/3} \frac{l}{d} \cos\theta$$

$$\delta \propto \left(\frac{\sin\theta + \phi_2}{\cos\theta} \right)^{1/3} \left(\frac{l}{d} \right)^{1/3}$$

と 表 わ す こ と が で き る。こ れ ら の 理 論 を 用 い
る と、沈 降 の 傾 斜 効 果 を か な り 良 く 説 明 で き
る。

最 後 に、折 曲 管 内 の 沈 降 に つ い て 述 べ る。
折 曲 管 の 傾 斜 傾 域 の 下 向 き 管 壁 の 下 側 に、薄
い 媒 質 層 が 生 じ る の は 直 管 の 場 合 と 同 様 で あ
る。こ の 媒 質 層 内 の 上 向 き 流 は 曲 折 部 か ら 上
側 で は サ ス ペ ン シ ョ ン の 中 で jet と し て 流

れ 込 む。こ の jet 流 れ は 周 辺 の サ ン ペ ン シ
ヨ ン と 混 合 し あ る 程 度 の 距 離 で 消 滅 す る。サ
ス ペ ン シ ョ ン の 境 界 層 は 直 管 (鉛 直、傾 斜)
の 場 合 と 比 べ て そ れ ほ ど 明 確 に は な ら ない。

参 考 文 献

- 1) 新見英幸、山本明美：血液のレオロジー、
臨床MEハンドブック(日本エム・イー学会
編) p.298、コロナ社/医学書院1984。
- 2) Boycott, A.E.: Sedimentation of blood
corpuscles. Nature 104: 532,
1920。
- 3) 岡 小天：バイオレオロジー、p.114、
裳華房、1984。
- 4) Hill, W.D., Rothfus, R.R., Li, K.:
Boundary-enhanced sedimentation due to
settling convection. Int. J. Multiphase
Flow, 3: 561, 1977。
- 5) Acrivos, A. Herbolzheimer, E.: Enhanced
sedimentation in settling tanks with
inclined walls. J. Fluid Mech
92: 435, 1979。
- 6) 新見英幸、山口三郎：傾斜管に於ける血
液沈降現象の解析 昭和60年度流体力学講
演会