テイラー・クエット流れ中の運動精子の挙動に関する実験的研究 (運動精子に及ぼす粘度の影響)

Experimental Study on the Behaviors of Motile Sperm in Taylor-Couette Flow (Effect of Viscosity on the Motile Sperm)

○学 遠藤弘樹 (米子高専) 正 早水庸隆 (米子高専) 松浦宏治 (岡山大) 正 百武 徹 (横国大)
正 柳瀬眞一郎 (岡山大) 正 森田慎一 (米子高専) 正 大塚 茂 (米子高専)

Hiroki ENDO, Yonago National College of Technology Advanced Course, 4448 Hikona-cho, Yonago-shi, Tottori
Yasutaka HAYAMIZU, Yonago National College of Technology, 4448 Hikona-cho, Yonago-shi, Tottori
Koji MATSUURA, Okayama University, 3-1-1 Tushima-cho, Okayama-shi, Okayama
Toru HYAKUTAKE, Yokohama University, 79-1 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa
Shinichiro YANASE, Okayama University, 3-1-1 Tushima-cho, Okayama-shi, Okayama
Shinichi MORITA, Yonago National College of Technology, 4448 Hikona-cho, Yonago-shi, Tottori
Shigeru OHTSUKA, Yonago National College of Technology, 4448 Hikona-cho, Yonago-shi, Tottori

A sperm sorter using microfluidic system (MFSS) has been developed to solve sterility caused by abnormality in male sperm. To improve more separation efficiency of this device, it is necessary to know the behavior of motile sperm in detail. Under these backgrounds, the movement of the sperm in the microchannel was investigated in the present study. The previous study clarified that the modeling of the behaviors of motile sperm in the shear flow was necessary. Therefore, in the present study, we experimentally investigated the behavior of the motile sperm in the Taylor-Couette flow using PTV (Particle Tracking Velocimetry) method. The experimental results showed that the sperm velocity increased with the ascent of the shear stress and its direction is opposite to that of the flow.

Key Words: Motile Sperm, Taylor-Couette Flow, PTV

1. 結論

現在少子化の原因として不妊症が挙げられるが、その要因として男性側の精子の異常や欠如が半数を占めている。そんな中で不妊治療への利用を目的に開発された、運動良好精子分離装置の更なる高効率化を目的とする研究において、流動流体中におけるせん断応力(粘性力)が精子運動に影響を与えている可能性があることが報告されている⁽¹⁾。そこで本研究では、流れにおける粘性力や遠心力が運動精子に影響を及ぼすメカニズムを実験的に調べることを目的として、テイラー・クエット流れ中の運動精子の挙動に関して実験的研究を行っている。本講演では、テイラー・クエット流れ中における運動精子の挙動の PTV 計測結果について報告する。

2. 記号及び関連する実験式

本研究で使用した実験装置の寸法は、ロータとケーシングのすき間(流路幅) $a = 1\text{mm}$ 、流路高 $h = 4\text{mm}$ 、ロータの半径 $R = 20\text{mm}$ である(図1, 図2参照)。本研究ではロータの回転数 ω [rad/s]から、式(1)を用いてテイラー数 Ta ⁽²⁾を求めた。

$$Ta = \frac{R\omega a}{\nu} \sqrt{\frac{a}{R}} \quad (1)$$

ここで、 ν は作動流体の動粘度 [mm^2/s] である。Taylor⁽²⁾は、テイラー数によって次のように流れを分類している。本研究においても下記の条件を基準に実験を実施した。

① $Ta < 41.3$: 層流クエット流れ

② $41.3 < Ta < 400$: テイラー渦を伴う層流

本講演では、せん断応力(粘性力)が運動精子に及ぼす影響を調べるために、 $Ta < 41.3$ における層流クエット流れで実験を実施した結果について報告する。

3. 実験方法

実験手順としては、流路内に試料である作動流体を流入させ充填する。作動流体は牛の精液、DNA 染色に使用する蛍光色素(ピロニン Y)、緩衝液(モディファイド HTF メディ

ウム)を混ぜたものである。ピロニン Y は精子を蛍光させるために用いた。また、モディファイド HTF メディウムは精子の洗浄に使用されているもので、精子に対して運動能力を減少させるようなことはない無害の液体である。流路はケーシングとロータによって形成されており、移動壁面であるロータを回転させることにより移動壁面と固定壁面の間に速度勾配が生じ、それによってせん断応力を発生させる(図1参照)。

Fig.1 Enlargement of the test section

Fig.2 Experimental setup

可視化方法は図2のように、流路側面へ波長 532nm の CW レーザシート (LaVision 社: CW-532-3W) を照射し、流路底面よりハイスピードカメラ (LaVision 社: HSS4G) で撮影した。撮影に際して、レンズは対物レンズを使用した。またハイパスフィルタ(透過波長 570nm 以上)を取り付けること

で、精子の蛍光のみを取得し速度分布を算出した。ロータの回転にはモータを用いた。

また、作動流体の粘度は精密回転式粘度計（英弘精機株式会社：ビスコテスターVT550）を用いて測定し、密度は比重びん（東京硝子器械株式会社）を用いて算出している。

4. 実験結果

4-1 物性値

以下に作動流体の物性値を示す。

Fig.3 Relationship between τ and γ

図3は希釈倍率 n における作動流体のせん断応力 τ [Pa]とせん断速度 γ [1/s]の関係を粘度計で調べた結果である。図を見ると $n=4$ と $n=6$ のどちらの希釈倍率においても $\tau \propto \gamma$ の関係であることが分かる。よって、希釈倍率が変化しても作動流体はニュートン流体であることが分かった。また、その他の温度でも同様の傾向が見られた。

Fig.4 Relationship between μ and n

図4は37℃での各希釈倍率 n における粘度の測定結果を示している。図4より希釈倍率が增大するにつれ作動流体の粘度は低下していることが分かる。実験条件は、作動流体の粘度の影響を調べるために希釈倍率を $n=4, 6$ とした。また、

精子が最も活発に活動するとされる、生体の温度に近い37℃を作動流体の温度とした。実験中も温度が変化しないように、流路の外を水で満たしヒーターで温めながら実験を行った。

4-2 精子速度

Fig.5 Sperm velocity in Taylor-Couette Flow

$n=4, n=6$ における精子の移動速度を図5(a), (b)に示す。縦軸 v は精子の移動速度をロータ周速度で無次元化したものであり、横軸はテイラー数 Ta である。各 n のテイラー・クーエット流れ中における運動精子の挙動に関して、テイラー数（せん断応力）が大きくなるに従って精子の移動速度は増加していく傾向にあり、その方向は流れと逆向きであることが示された。

また過去の研究では、 $Ta=1, 3, 7$ において粘度は精子挙動に影響を与えず、せん断応力の影響によるところが大きいことが示された。本研究では Ta の範囲を広げたことにより、せん断応力の上限が上がった。図5より同じ Ta で比較すると、 v は粘度の高い $n=4$ で大きな値を示していることが分かる。これは同じ Ta においては粘度が高い $n=4$ のほうが流速は大きく、せん断応力も大きくなるためであると考えられる。よってせん断応力の範囲が拡大しても、精子運動は粘度の大きさによらず、せん断応力による影響を受けることが示された。この結果はSmithら⁽³⁾の報告とも一致している。

引用文献

- (1) 橋 度羽, 他 6 名, 「流動流体中における運動精子の挙動に関する実験的研究」, 日本機械学会中国四国支部第 49 期総会・講演会講演論文集, No.115-1, (2011), pp.171-172.
- (2) Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, 7th ed., (1987), pp. 525-529, McGraw-Hill Pub. Co.
- (3) Smith, D. J., Gaffney, E. A., Gadelha, H., Kapur, N. and Kirkman-Brown, J.C., Bend propagation in the flagella of migrating human sperm, and its modulation by viscosity, *Cell Motil and the Cytoskeleton*, Vol. 66, Issue 4 (2009), pp. 220-236.