

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560201

研究課題名(和文) バイオ繊維懸濁液の抵抗減少効果に関する研究

研究課題名(英文) Drag Reduction of Bio-Fiber Suspensions

研究代表者

渡辺 敬三 (Watanabe, Keizo)

首都大学東京・理工学研究科・名誉教授

研究者番号：20072134

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：絹糸、綿糸及び麻糸の長さ及び直径比であるアスペクト比(1/d)がそれぞれ2.2～13.1, 26.3及び52.0, 及び濃度が250～2500ppm範囲の懸濁液に対する円管内圧力損失を測定して、最大20%の抵抗減少効果を得た。また、抵抗減少効果はアスペクト比、懸濁液の濃度及び繊維のヤング率に依存し、ヤング率が供試繊維の中で最も大きな麻糸の懸濁液が最も大きい抵抗減少効果を示すことが明らかにされた。次元解析によって抵抗減少率をアスペクト比、濃度及びヤング率を動圧で除した無次元数の積と相関して実験式を求めた。得られた実験式は実験値と±30%の範囲で一致することが明らかにされた。

研究成果の概要(英文)：Drag reduction phenomena of bio-fiber suspensions of silk threads, cotton yarn and hemp fibers in a circular pipe were investigated within the aspect ratio  $l/d=2-52$  and the concentration  $C_w=250-2,500\text{ppm}$ , experimentally. For comparison, measurements were also performed on the Newtonian solvent. Pressure drop measurements indicated that the wall shear stress of the pipe decreased by a maximum of approximately 20% compared to that of water. Drag reduction ratio were correlated with the non-dimensional parameter involving Young's modulus by non-dimensional analysis. It was shown that the equation agrees with the experimental data within 30%.

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体力学

キーワード：流体力学 内部流 円管内流れ 圧力損失 バイオ繊維懸濁液 抵抗減少効果

1. 研究開始当初の背景

流体の抵抗減少効果の応用は各種流体輸送システムにおける管路損失の低減化と関連し、その輸送動力の省エネルギーと直接結びつく。また、その抵抗減少効果のメカニズムを明らかにすることは乱流制御の観点からも工学的に注目されている。一方、抵抗減少効果は外部からのエネルギー供給の有無によって、能動的および受動的な手法の二つに分類される。後者の受動的な方法は低減量が比較的大きく簡便な手法であり、トムズ効果<sup>(1)</sup>の報告以来多くの研究がなされてきた。それらの代表的な抵抗低減剤は高分子<sup>(2)</sup>や界面活性剤<sup>(3)</sup>である。しかしながら、これらの人工的な抵抗低減剤の工業的な応用では劣化や溶液の廃棄の際の環境負荷の増加が課題となっている。それゆえ、抵抗低減剤としてのバイオポリマー<sup>(4),(5)</sup>や繊維<sup>(6)~(8)</sup>の可能性や系統的な実験による抵抗減少率の予測が期待されていた。

2. 研究の目的

本研究は溶液の漏えいや廃棄においても環境負荷を与えないバイオ繊維に着目して、溶液劣化特性を含めたそれら懸濁液の抵抗減少効果の円管内流動における損失特性を実験的に明らかにし、抵抗減少率の定量的な評価を行うことを研究目的とする。

3. 研究の方法

3-1 供試バイオ繊維 供試繊維としてはアスペクト比( $l/d$ )が13.1及び2.2として26.3、52.0である、それぞれ絹糸、麻糸及び綿糸の三種類の繊維を実験に使用した。また、絹糸繊維は直径の異なる二種類を用意した。各繊維とも直線状で、綿糸が最も細くなっている。実験では各繊維を細かく切断し、溶媒である水道水と混合してミキサーで撹拌して使用した。

図1にサンプリングした供試繊維の直径と長さを示す。実験値の整理には図中の実線で示される値をアスペクト比として代表させた。それらの諸元を表1に、形状を示す写真をそれぞれ図2に示す。

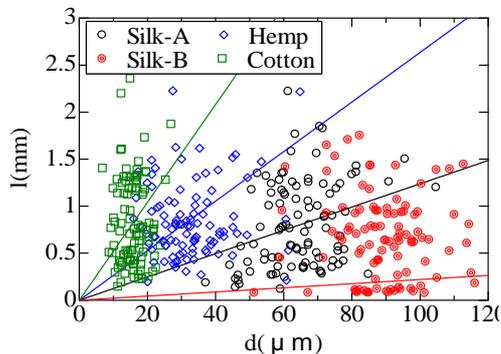


図1 供試繊維のアスペクト比

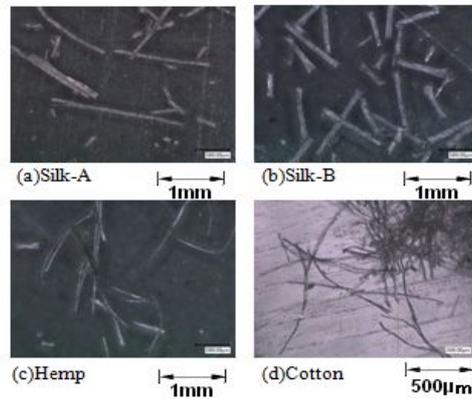


図2 供試バイオ繊維

表1 供試バイオ繊維の諸元

Fiber	$d$ ( $\mu\text{m}$ )	$l/d$	Young's Modulus E (GPa)
Silk-A	64.3	13.1	11.76
Silk-B	89.2	2.2	11.76
Hemp	32.5	26.3	35.28
Cotton	15.8	52.0	9.80

3-2 供試管路系 実験に使用した装置の概略を図1に示す。実験装置は貯水タンク、インバータ制御されたポンプ、測定管路、電磁流量計で構成された全長5100mmの開ループ管路である。本実験で使用する水の量は50である。配管は内径15mmのステンレス管を使用し、圧力損失の測定は300mm間隔の圧力測定孔に接続した圧力計で行った。

流体の流量はバルブを閉鎖することにより調整し、それは電磁流量計で測定された。圧力損失、タンク内の水温、流量などの測定値はデータロガーを介してパソコンに瞬時データを取り込み、データ処理を行った。供試繊維懸濁液は外部タンクで濃度調整を行い、管路内のタンクに注入した。懸濁液の圧力測定は測定孔の目詰まりによる測定誤差が発生する。実験は水道水を循環させた後に懸濁液の測定を行った。

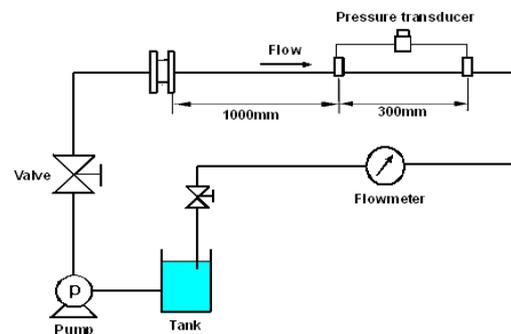


図3 実験装置(配管系)

#### 4. 研究の成果

4-1 実験結果 図4に実験結果の一例として、せん断応力  $\tau_w$  と流量を管断面積で除した平均流速  $U$  の関係を示す。実線は水のみの値である。図から明らかなように、いずれの懸濁液においても平均流速の増加に伴い、せん断応力は減少し、図中に破線で示す  $\tau_w \propto U^{1.75}$  の関係を満たしていることが分かる。このことは管摩擦係数と  $Re$  数との関係でみれば、管摩擦係数は水のみの値と比較してほぼ平行に低減することが予測され、バイオポリマーと同様にその抵抗減少効果の特性は Type B と言える。

図5はこれらの実験値を管摩擦係数で整理した結果である。上述したように供試懸濁液の管摩擦係数の  $Re$  数に対する変化は水のみのその値と比較してほぼ平行になり、Virkら<sup>(4)</sup>によって指摘されたバイオポリマーの管摩擦係数の挙動と類似している。濃度の増加に関して、管摩擦係数はその増加に伴い増加する。この抵抗減少効果を定量的に把握するために、抵抗減少率  $DR$  を次式のように定義する。ここで、添え字  $n$  及び  $s$  はそれぞれ水及び懸濁液の値を表す。

$$DR(\%) = \left( \frac{\lambda_n - \lambda_s}{\lambda_n} \right) \times 100 \quad (1)$$

図6及び図7にそれぞれ抵抗減少率に及ぼす供試繊維の長さとの比であるアスペクト比  $l/d$  及び濃度  $Cw$  の影響を示す。図6から、アスペクト比に対して本実験範囲では  $l/d = 50$  で抵抗減少率の値が飽和していることが分かる。一方、濃度に関して、 $Cw = 2500$  で最大抵抗減少率を示し、その飽和現象が認められる。また、繊維の種類に関しては絹糸、綿糸及び麻糸の順に抵抗減少率は増加する傾向をもつ。

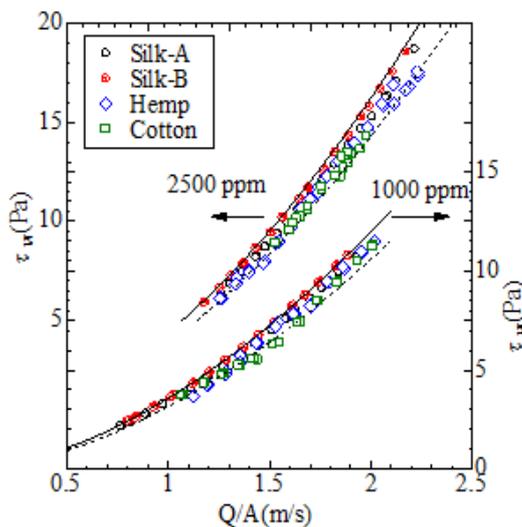
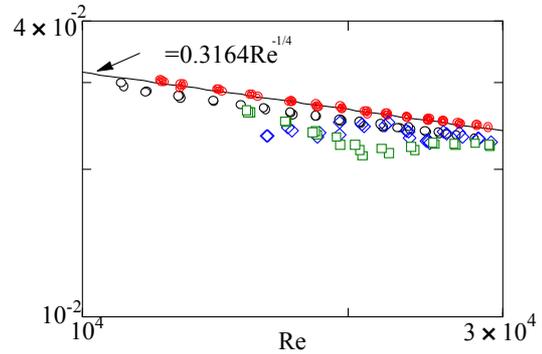
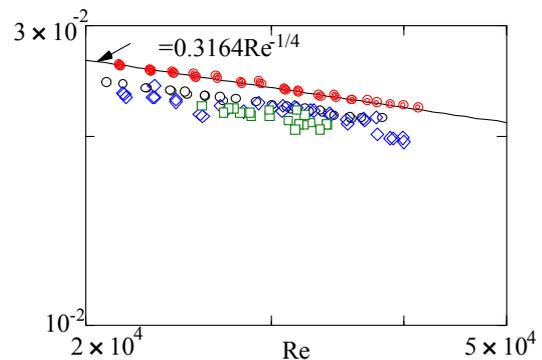


図4 管内壁のせん断応力



(a)  $Cw=1000\text{ppm}$



(b)  $Cw=2500\text{ppm}$

図5 管摩擦係数

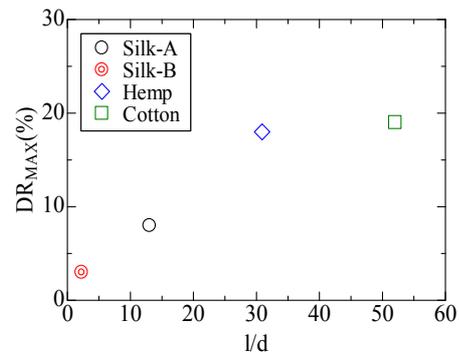


図6 抵抗減少率のアスペクト比の影響

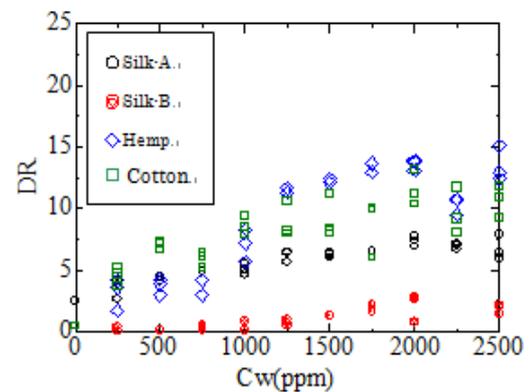


図7 抵抗減少率の濃度の影響

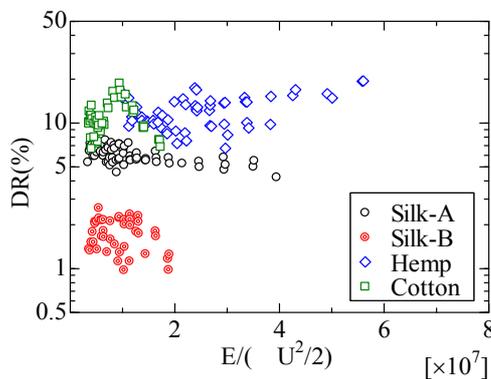


図 8 抵抗減少率のヤング率の影響

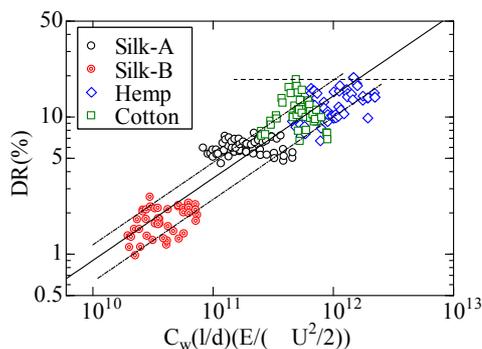


図 9 式(3)と実験値の相関

本研究によって得られた抵抗減少効果の生ずる原因として、定性的には液体内の繊維挙動が乱流域における乱れの緩和に影響を与えているものと考えられる。その繊維挙動を表すと考えられる物性値としては、一義的には繊維のヤング率  $E$  が考えられる。図 8 は横軸にヤング率<sup>(9)</sup>を動圧で除した無次元数  $E/(\rho U^2/2)$  をとって抵抗減少率を整理したものである。

4-2 実験結果の考察 以上の実験結果から、抵抗減少率はアスペクト比、濃度そしてヤング率を含む無次元数に依存することが明らかにされた。よって、抵抗減少率に対して、次元解析から次式が得られる。

$$\left( \frac{\lambda_n - \lambda_s}{\lambda_n} \right) = \phi \left( C_w, \frac{l}{d}, \frac{E}{\rho U^2/2} \right) \quad (2)$$

図 9 は式(2)を用いて実験値を相関させたものである。図中の実線は次式を示す。

$$DR(\%) = 9.0 \times 10^{-7} \left[ C_w \times \left( \frac{l}{d} \right) \times \left( \frac{E}{\rho U^2/2} \right) \right]^{0.6} \quad (3)$$

図中の波線は  $\pm 30\%$  の値であり、式(3)

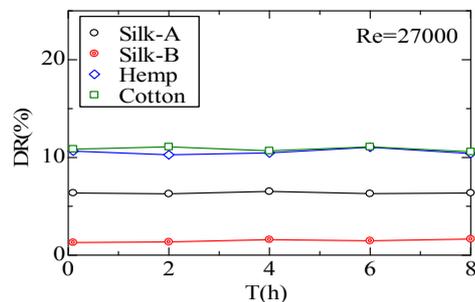


図 10 ポンプ運転時間による劣化の影響

はそれらの誤差範囲で実験値を予測できることが分かる。

一方、抵抗低減剤を用いて抵抗減少効果を得る場合に、得られた抵抗減少効果が駆動するポンプや管路内の流動によってその効果が失われる現象、すなわち劣化現象が実際的な応用に対して問題となる。一般的に言えば、高分子溶液などと比較して、繊維懸濁液は劣化現象を生じにくいと考えられるが、このことを検証した結果が、図 10 である。図は横軸にポンプの連続運転時間をとって抵抗減少率を整理したものである。濃度は 2500ppm である。供試懸濁液は連続運転に伴う温度上昇を抑えるために、冷却装置を設け、実験中の温度は一定に保たれている。図から明らかなように、その抵抗減少率はポンプ運転に対して連続 8 時間経過しても抵抗減少率はほとんど変化せず、一定であり劣化現象は生じないことが分かる。この劣化を生じにくいことは、工業的応用に対する供試バイオ繊維懸濁液の優位性の一つと言える。

4-3 まとめ 絹糸、綿糸及び麻糸の三種類のバイオ繊維懸濁液を用いて、円管内の圧力損失に対する抵抗減少効果を実験的に明らかにした。得られた抵抗減少率は最大約 20% で、次元解析的にその実験式が繊維のヤング率を含む無次元数によって得られ、それは実験値を  $\pm 30\%$  の範囲で予測することができることが明らかにされた。また、ポンプの連続運転によって、供試懸濁液はほとんど劣化しないことが明らかにされた。

#### 参考文献

- [1] Toms, B. A., Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers, Proc. of the First Inter. Cong. on Rheology, 2, 1948, pp. 135-141.
- [2] Hoyt, J. W., Drag Reduction in Polysaccharide Solutions, Trends In Biotechnology, 3-1, 1985, pp.17-20.
- [3] Zakin, J.L., Lu, B., and Bewersdorff, H.-W., Surfactant Drag Reduction, Reviews

in Chemical Engineering, Vol. 14, No. 4-5, 1998, pp. 253-320.

[4] Virk, P.S. and Chen, R.H., Type B Drag Reduction by Aqueous and Saline Solutions of Two Biopolymers at High Reynolds Numbers, Proc. of the 2nd Inter. Sym. on Seawater Drag Reduction, 2005, pp. 545-558.

[5] Watanabe, K. and Ogata, S., Drag Reduction by Culture Solutions of Dry Malted rice, Proc. of IMECE2009,10421, 2009, pp1-5.

[6] Daily, J. W. and Bugilarello, G., Basic Data for Dilute Fiber Suspensions in Uniform Flow with Shear, Tappi, 44, 7, 1961, pp.497-512.

[7] Walter Mih and Joseph P., Velocity Profile Measurements and a Phenomenological Description of Turbulent Fiber Suspension Pipe Flow, Tappi, 50, 5, 1967, pp.237-246.

[8] Kato, H. and Mizunuma, H., Frictional resistance in Fiber suspensions (1<sup>st</sup> Report, Pipe flow), Bulletin of JSME, 26, 212, 1983, pp.231-238.

[9] Fiber Handbook, The Society of Fiber Science and Technology, Japan, Pl.2, Maruzen Pub. Co. Ltd, (1994), p.15.

#### 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 1件)

中村大吾, 栃木 弘, 小方 聡, 渡辺敬三, 界面活性剤水溶液の抵抗減少効果に関する研究(溶液や添加剤が円管内流動に及ぼす影響), 日本機械学会論文集(B編), 79巻, 801号, (2013年5月), 152-160, 査読有.

〔学会発表〕(計 5件)

T. Kubo and S. Ogata, Flow Properties of Bamboo Fiber Suspensions, ASME 2012 IMEC&E, (Nov. 2012).

K. Watanabe, Laminar Drag Reduction and Its Application, Joint ERCOFTAC/PLASMAERO Workshop, (Dec., 2012). (Florida, USA)

渡辺敬三, 小方 聡, バイオ繊維懸濁液の抵抗減少効果, 日本機械学会 2013 年年次大会, (2013年9月), (岡山大学).

K. Watanabe and S. Ogata, Drag Reduction of Fiber Suspensions, ICFM 2013, (Oct., 2013), (Barcelona, Spain).

S. Ogata, Drag reduction of nata de coco suspensions in circular pipe flow, ICR&MM, (Oct., 2013).

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

渡辺敬三 ( KEIZO WATANABE )  
首都大学東京 理工学研究科 名誉教授  
研究者番号: 20072134

##### (2) 研究分担者

小方 聡 ( SATOSHI OGATA )  
首都大学東京 理工学研究科 准教授  
研究者番号: 50315751

##### (3) 連携研究者

なし