

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760164

研究課題名(和文)精密濾過における懸濁物質の堆積・閉塞過程の可視化と乱流クロスフローの効果

研究課題名(英文)Effect of turbulent cross-flow on suspension layer in micro filtration process

研究代表者

板野 智昭 (Itano, Tomoaki)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：30335187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：浄水処理や空気清浄などの濾過技術は現代の生活に欠かせない。原理は懸濁液を細孔をもつ濾過膜に透過させることが主となるが、時間経過とともに膜に積層する懸濁物質の層(ケーキ)による圧損の増大により透過量が減ることが工学的問題となる。ケーキの積層を減らしながら濾過を続ける効果的な手法の一つにクロスフロー濾過があるが、効果を高くするためにはクロスフロー濾過においては透過流を乱流状態にすることが重要である。本研究でスパン方向に軸をもつ渦を誘起することが、乱流への遷移を促す上で効果的であることを明らかにし、乱流状態の程度を特徴づけるクロスフローのレイノルズ数と積層するケーキの成長率の関係を提示する。

研究成果の概要(英文)：Filtration technologies such as clean air and water treatment is indispensable to sustaining our modern life. The main mechanism underlying these technologies is that suspended particles are separated from suspension by filtration through a membrane with fine pores. However, the permeability gradually decreases due to an increase in pressure loss caused by an accumulated layer of suspended material, "cake", on the membrane, which is a key problem on the technology. As one of solutions for the problem, the cross-flow filtration method, where suspension in turbulent state is swept to the parallel to the membrane, can effectively reduce the thickness of cake in the filtration process. The present work elucidates that the turbulent state can be induced via the laminar-turbulent transition via a small perturbation with spanwise vortices.

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：精密濾過 乱流遷移 剪断流

1. 研究開始当初の背景

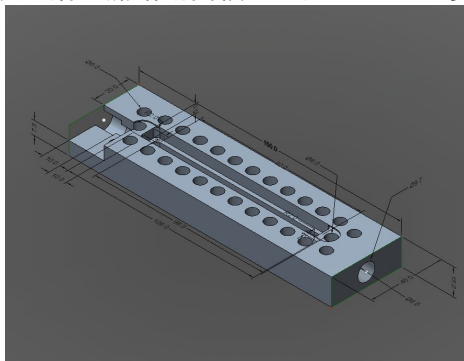
精密濾過膜による懸濁物質の膜分離工程は浄水処理など広く活用されている。工程が進むにつれ懸濁物質が膜面に積層(ケーキ)すると、透過液の圧損が増大するため透過流量が減少する。そこで実際の膜分離工程では懸濁液側に積層するケーキ上の流れに攪乱を与え、ケーキの積層を抑える工夫が施されることがある。外的な圧力勾配を膜面に垂直にかけると、膜面に平行にも圧力勾配を課すことで膜面上に剪断を有する流れを誘起しケーキの積層を抑える膜分離工程はクロスフロー濾過と呼ばれる。クロスフロー濾過は従来ケーキ除去法的主要技術として使われてきた助剤などを用いる方法と並んで近年注目を浴びている。クロスフロー濾過による分離工程の機構は巨視的レベルでは、ある程度まで理解が進んでいるが、クロスフローにより運ばれる粒子の運動や微視的な視点からの分離工程の理解は不十分なままである。

2. 研究の目的

本研究では、クロスフロー濾過において膜面上の懸濁液の流れが層流から乱流状態に遷移した場合、透過流量などマクロな統計量が受ける影響を、実験や数値計算をとおして検証を行うことを目的とした。特に膜面上に積層するケーキの成長を顕微鏡下で観察すること、堆積量と透過流量の計測、数値計算による剪断流れのケーキに対する効果を解析することを具体的な研究目的としている。

3. 研究の方法

(1) 0.5[mm] × 10.0[mm]の矩形断面の流路を用意した(下図)。流路壁面の一方には強化ガラスを設け、他方には孔径 0.2[μm]の多孔性の膜を設置する。膜は、膜孔径よりも十分大きい多数の細かい孔をもつステンレス製の網で流路断面積が一定となるように



支持されており、膜の外側(透過流側)の圧力は常に大気圧に等しい。流路の上流から下流に向けてポンプで圧力勾配をかけることで懸濁液を循環させると、膜の表裏における圧力差により懸濁物質の膜分離がすすみ、膜から透過液が染み出す。しかしながら、流路内の流速が小さい時、流路内の流れは層流状態にあり、壁面からのケーキの剥離は期待できない。従って、時間経過とともにケーキの

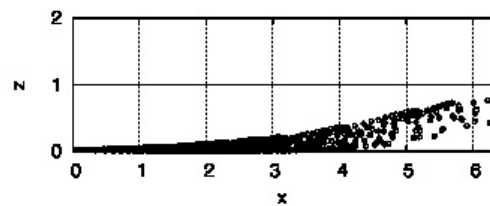
成長や膜孔閉塞が進み、透過流量は減少し続ける。一方、流速が大きい時は流路内の流れは乱れた状態になるため、前例の場合と比べ、透過流量の低下が抑えられることが期待できる。このように流路内流量と透過流量の減少率の間に相関関係が成立することをマクロな量から検証し、懸濁液の循環流量と透過流量の関係を明らかにする。

(2) 単純剪断流において層流乱流遷移に特徴的なスパン方向に鏡像対称性を有する解(ヘアピン渦解)が濾過流路内における流れのモデルとなるものと仮定して、流路の上流から下流に至る積層したケーキから懸濁粒子が分離する度合いを上流からの距離の関数として定量化する。現実の流路は下流方向に有限の長さしか持たないため、ケーキの分離効率は流路内流れのレイノルズ数、モデルとして用いた解の流れ方向およびスパン方向の波長、流路の長さ、粒子のサイズの関数となる。

(3) 上述のヘアピン渦解の高レイノルズ数の平面クエット流における性質を調べ、層流乱流遷移における解の役割を数値的に調べる。

4. 研究成果

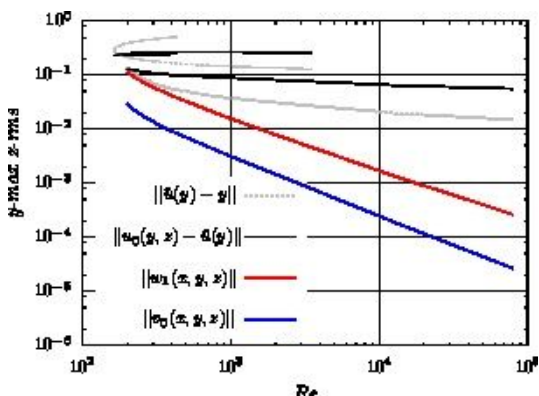
研究の方法(1)に挙げた実験については、残念ながら、十分な確証をもって公に公表できる結果を本報告作成段階でも得られなかった。原因としてはポンプの拍動が少なからず流路に入り込む乱れに影響をもたらしたこと、流路の長さの制限から十分な長さの助走距離が確保できていない、多孔質膜の振動などにより膜厚がきちんと固定できていないなどの理由が考えられる。研究期間に受けた助成をもとに今後、これらの点を解明していきたい。



研究の方法(2)に挙げた壁面から放出された粒子が下流で示す流路断面内分布については一定の成果が得られた。粒子の運動方程式にはMaxey-Riley方程式を援用し、粒子の軌跡に慣性やストークス抵抗以外の効果も加味した。図は壁面間距離(縦軸)を2に無次元化した場合、低レイノルズ数の時の計算の一例で、流路の上端の下壁面近傍(膜近傍)から放出された粒子が一定時間が経過して下流に流された時の位置の分布を表している。流路の上流端の壁面近傍(膜近傍)から

放出された粒子が下流に流れるにつれ膜から離れた領域に分布が広がる一方で、流路の壁面近傍では流速が遅いため壁面に付着したまま下流に流されている粒子も多く存在する。放出された各粒子について、粒子が流路下流端に至るまでの経過時間と膜へ向かう透過流速の積が、粒子の壁面からの距離よりも大きい場合、粒子は壁面に再付着するものと仮定すると、クロスフローの平均流速に基づくレイノルズ数とケーキの成長率を定量的に関係づけることができることが分かる。これらの推算に基づくと、レイノルズ数がある臨界値を越えると、クロスフロー濾過の際のケーキ成長率を0以下に抑えることができる。これらの結果は今後学会などで発表を予定している。

研究方法(3)に挙げた研究では、本研究代表者らが過去に発見した平面クエット流における不安定常解の高レイノルズ数極限における性質を数値的に調査した。平面クエット流では実験で層流乱流遷移がおきるとされる乱流状態の下限レイノルズ数よりもはるかに低いレイノルズ数でナビエ・ストークス方程式の厳密な不安定常解を数値的に求めることができる。従来知られていた解の多くは、レイノルズ数の増加とともに層流状態からの解の差(相空間におけるノルム)が0以上の有限値に収束する(下図において一番上の黒色の線。Reが上昇しても層流状態からの差(縦軸)は減少しない)ことが知られていたが、我々が発見した解はこれらに比べると小さな値へと減衰(下図において上から2番目の黒線や赤・青線。色の違いは解の有するモードのうち、いくつかの代表的な成分に相当する。)することが分かった。このことは、高レイノルズ数において、今回発見された解が層流が乱流に遷移する際の指標とみなせることを示している。



乱流状態は時間的に変動を伴う流れ場なので、濾過における微小な懸濁粒子の軌道の予測は、流れ場自体の予測とともに困難である。従って、今回のような指標となる渦を有する定常解を使って、懸濁物質の混合やケーキ成長の下限値の予測を行うことが有効となる。

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3件)

Tomoaki Itano, Takeshi Akinaga, Sotos C. Generalis Masako Sugihara-Seki, "Transition of Planar Couette Flow at Infinite Reynolds Numbers", Physical Review Letters, vol. 111. (2013) 184502-1-4 (査読あり).

板野智昭, 二宮隆弘, "同心二重球殻内の熱対流について", 関西大学理工学会誌「理工学と技術」, vol. 20 (2013), pp.37-41. (査読なし)

板野智昭, "平板間ミニマム流れの周期解", 日本流体力学会誌「ながれ」, vol. 30 (2012), pp.245-248 (査読なし)

[学会発表](計11件)

板野智昭, 秋永剛, Sotos C. Generalis, 二宮隆弘, 関眞佐子, "高レイノルズ数剪断流れにおける渦構造の対称性", 日本機械学会第91期流体工学部門講演会, 2013/11/19, 九州大学

T. Itano, Sotos C. Generalis, T. Ninomiya, T. Akinaga, M. Sugihara-Seki, "symmetry of Vortices in transition of Plane Couette Flow at Moderate Reynolds Number", 14th European Turbulence Conference (ETC14), 2013/09/04, Lyon, France

T. Itano, S.C. Generalis, T. Ninomiya, T. Akinaga, M. Sugihara-Seki, "The Role of the Hairpin Vortex Solution on Laminar-Turbulent Transition of Plane Couette Flow at Moderate Reynolds Number", 8th Turbulent Shear Flow Phenomena (TSFP8), 2013/08/30, Poitiers, France.

二宮隆弘, 板野智昭, 関眞佐子, 牧野真人, "剪断を伴う球殻内熱対流の渦構造の変形", 日本物理学会第68回年次大会, 2013/03/27, 広島大学

板野智昭, Sotos C. Generalis, 二宮隆弘, 関眞佐子, "ミニマル平面クエット乱流の遷移と解の対称性について", 九州大学応用力学研究所研究集会, 2013/02/22, 九州大学

Tomoaki Itano, Sotos C. Generalis, Takahiro Ninomiya, Masako Sugihara-Seki, "Hairpin vortex solution of plane Couette flow at moderate Reynolds number", France-Japan Workshop on Subcritical Transition to Turbulence, 2012/10/11, 大阪大学

二宮隆弘, 板野智昭, 牧野真人, 関眞佐子, "半透膜孔内の脈流の分子動力学計算", 日本流体力学会 2012, 2012/09/17,

高知大学
板野智昭、 竜門賞受賞講演 “ 平板間ミ
マム流れの周期解 ”、日本流体力学会年会
2012, 2012/09/17, 高知大学

Tomoaki Itano, Stoso C. Generalis,
John P. Fletcher, Takeshi Akinaga,
Masako Sugihara-Seki, “Numerical
search for the hairpin vortex solution
in moderate Reynolds number”,
International Congress of Theoretical
and Applied Mechanics 2012
(ICTAM2012), 2012/08/23, Beijing,
China.

Tomoaki Itano, “Coherent Vortices in
Plane Couette flow – Bifurcation,
Symmetry and Visualization”,
Geophysical Fluid Dynamics Program
“Shear Turbulence: Onset and
Structure, 2011/07/29, WHOI, Ma,
USA

板野智昭, “ 熱対流中の不安定ロール状構
造 ”, 第 3 4 回日本バイオレオロジー学
会年会, 2011/06/04, 関西大学

(3) 連携研究者 ()

研究者番号 :

〔 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

板野 智昭 (Itano, Tomoaki)
関西大学・システム理工学部・准教授
研究者番号 : 30335187

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :