

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（C）一般
研究期間：2007～2008
課題番号：19560156
研究課題名（和文） 微生物バイオリアクターへのテーラ渦カオス混合の応用と血液濾過装置のための流体解析
研究課題名（英文） Application of a chaos mixing Taylor vortex flow for the two phase flow in bioreactors, and the flow analysis for approaching the blood filtration
研究代表者 河合 秀樹（KAWAI HIDEKI） 室蘭工業大学・工学部・准教授 研究者番号：20292071

## 研究成果の概要：

固液混相流や固気混相流における最適な攪拌・混合法を見つけることは、化学装置やバイオリアクター、あるいは鉄鋼炉の設計等において重要な指針を与える。本研究では攪拌混合が比較的緩やかな Taylor vortex flow (TVF) に注目し、微生物などの増殖率の増加効果や濾過装置への応用を視野に入れた流れの解析に主眼をおいた。TVF は単純な装置であり、乱流へも段階的に遷移する（スケール遷移）ため、カオス混合など、せん断力に弱い微生物や細胞の効果的な混合法の開発に大きく発展すると思われるが、未解明な点も多い。

本研究では、 $\Gamma$  が小さく ( $\Gamma=3$ )、上下境界端効果を有する TVF を用いて、その固液混合特性を可視化法、並びに超音波流速分布計測法を用いて解析した。この結果、渦モードによってカオス混合への遷移状況が大きく異なり、渦自身が自励振動する場合や、渦と渦の界面が振動する場合など、そのメカニズムが大きく異なることが明らかになった。また、この TVF 装置を利用した光合成微生物増殖用バイオリアクターを試作し、培養実験を行った。光合成微生物が強いせん断流れによって破壊された場合の定量的な検出法を開発し、これを用いて TVF の効果を調べたところ、 $Re=30,000$  までの速い流れでも微生物は破壊されることなく順調に増殖した。ただし、 $Re>60,000$  では細胞破壊が検出される場合が観察され、不安定な挙動を示した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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：Taylor 渦、固気液分離、カオス、混相流、微生物流動、レーザードップラ流速計、超音波ドップラ流速計

## 1. 研究開始当初の背景

血液濾過による血漿分離法は信頼性の高い医療技術として発展しているが、フィルターに圧力をかけて被除去物質をフィルター膜表面に堆

積させ濾過する方法が主流である。しかし、この濾過を長時間続ければ、フィルターはいずれ目詰まり (cake) を来し、圧力損失を急激に上昇させる。この cake 層を少なくし、低い

圧力損失で効率的に連続濾過できるシステムが特に医療分野で望まれている。通常ペラのような強撹拌処理で cake は除去できるが、細胞壁を持たない動物細胞（血球細胞）を有するバイリアクタ内でこのような強せん断を施せば、殆どの細胞は破壊されてしまう。

## 2. 研究の目的

この問題を改善する一方法として、Taylor 渦 (Taylor Vortex Flow : TVF) によるバイリアクタや濾過装置に注目する。TVF は構造が簡単で、且つ穏やかな撹拌で細胞を極力傷つけることなく、効率的な撹拌が期待されるため、細胞を含むバイリアクタ分野での培養・濾過・濃縮に適する。また最近ではカス混合など、多様な混合の可能性を秘めていると言われる。しかし、その流体力学的な解析は未解明な部分も多い。

## 3. 研究の方法

本研究では、アスペクト比 ( $\Gamma$ ) が小さく ( $\Gamma=3$ )、上下境界端効果を有するコバケタな TVF 装置を用いて、その固液混合特性を可視化法、並びに超音波流速分布計測法を用いて解析する。また、この装置を利用した光合成微生物増殖用バイリアクタを試作し、培養実験を行う。光合成微生物が強いせん断流れによって破壊された場合の定量的な検出法を開発し、これを用いて TVF の効果を調べる。

## 4. 研究成果

渦が最も安定に存在する正規 2 セルモード (N2-mode) と正規 4 セルモード (N4-mode) に焦点を当て、外円筒上部から蛍光粒子を投入し、混合状態をレーザーシート光によって観察した。この結果、Reynolds 数を上昇させると、振動モードが現れ、混合が一挙に促進され、均一な混合状態が達成されるものの、そのメカニズムはカス的であり、渦モードによっても大きく異なるなど、複雑な流れを呈した。そこで、UVP (Ultrasonic Velocity Profiler) を用いた時空間同時計測法によって速度分布を測定した。速度成分の周波数とパワースペクトルを測定したところ、 $Re=700$  では、約 1.2Hz にシャープなスペクトルが発生し、 $Re=900$  では 1.7Hz にシフトしつつ数本のスペクトルに分岐した。これらのスペクトルとそのエネルギー密度の空間分布を比較することにより、振動モードの発生源が渦自身の自励振動による場合と、渦と渦の境界のみが振動する場合など、カス的な挙動を定量的に測定することが可能となった。

また、この TVF 装置を利用した光合成微生物増殖用バイリアクタを試作し、培養実験を行った。光合成微生物が強いせん断流れによって細胞破壊された場合の定量的な検出法 (吸光度スペクトル法) を開発し、これを用いて TVF の効果を調べたところ、 $Re=30,000$  までの速い

流れでも微生物は破壊されることなく順調に増殖した。これは他の撹拌と比べても全体

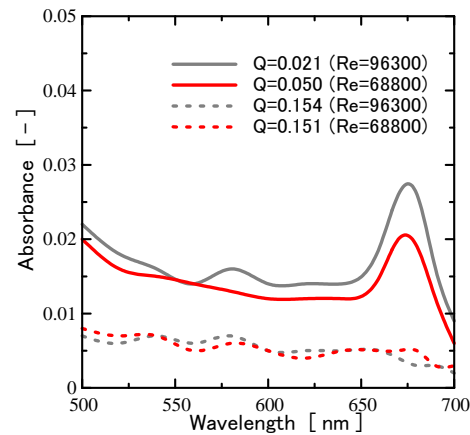


図 波長に対するクロフィル a の吸光度スペクトル

的に乱流の強い領域である。 $Re>60,000$  では、細胞破壊が検出される場合があり不安定挙動を示した。上図は、 $Re=68,800, 96,300$  の流れにおいて、細胞破壊が検出された場合とされなかった場合について、それぞれ吸光度スペクトルを示した結果である。図中、 $Q$  は一日あたりの細胞増殖率を示す。細胞が破壊され細胞内のクロフィル a が外部に漏れる場合には、波長 675nm に特異的な吸光度ピークが検出される。この結果、同じ  $Re$  でも、波長 675nm にピークが現れ、細胞破壊が生じる場合が示された。このとき、増殖率  $Q$  は細胞破壊が検出されなかった場合と比べて明らかに低い値を示し、明確な相関が得られることがわかった。

今後、流体挙動の高精度測定実験と、細胞破壊率の定量測定実験を、より充実させることにより、カス混合のメカニズム解明とともに、細胞を損傷させずに、高率な撹拌・混合・濾過が可能なバイリアクタの開発を目指す予定である。

## 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 11 件)

- ① H.AMBARITA, K.KISHINAMI, M.DAIMARUYA, I. TOKURA, H. KAWAI, J.SUZUKI, M. KOBAYAMA and A. GINTING, The Optimum Plate to Plate Spacing for Maximum Heat Transfer Rate from a Flat Plate Type Heat Exchanger, Thermal Science & Engineering, vol.17, pp.1-8, 2009, 査読有
- ② 河合秀樹, 高橋洋志, 中心装入粒子の密度や摩擦特性が高炉内固体粒子流れと炉芯挙動に与える影響の数値解析, 鉄と鋼, 第 94 巻 4 号, pp. 107-114, 2008, 査読有.
- ③ Yasushi Ido., Hideyuki Nakagawa, Takahiro Kunitomo and Hideki Kawai,

“Numerical Analysis of the Behavior of Magnetic Fluid in Traveling Magnetic Field Using the ALE GSMAC FEM”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.28, No.1-2, pp.33-39, 2008, 査読有.

- ④ 高橋洋志, 河合秀樹, 福井俊史, 松本勇氣, 松井良行, 高炉内固体流れとガス静圧の不連続挙動に与える羽口ガス流量と炉芯性状の影響, 鉄と鋼, Vol.93, No.10, pp.615-624, 2007, 査読有
- ⑤ 河合秀樹, 高橋洋志, 千葉誠一, 高集塵効率・低圧力損失の複層式グラニューラーフィルター, 化学工学論文集, 第33巻5号, pp.427-431, 2007, 査読有.
- ⑥ Suzuki, J., Ambarita, H., Kishinami, K., Daimaruya, M. and Kawai, H., Study on Flow Field and Heat Transfer Characteristics of Heat Sinks with Continuous, Offset Strip, or Pin Fins Cooled by Laminar Duct Flow, Journal of Japan Solar Energy Society, Vol.33, No.6, pp.41-49, 2007, 査読有.
- ⑦ Kawai, H., Kudo, H. and Takahashi, H., Visualization of a Limit Cycle Orbit in a Taylor Vortex Flow with a Short Annulus, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.40, No.11, pp.944-950, 2007, 査読有.
- ⑧ 河合秀樹, 鄭永輝, 高橋洋志, 水エマルジョン燃料に向けた亜臨界水熱処理による食用油の加水分解特性, 寒地技術論文・報告集, 第23巻, pp.46-49, 2007, 査読有.
- ⑨ 河合秀樹, 高橋洋志, 石炭灰を想定した環状グラニューラーフィルターの集塵効率実験と濾材粒子挙動の数値解析, 寒地技術論文・報告集, 第23巻, pp.55-60, 2007, 査読有.
- ⑩ 河合秀樹, 田中文武, 山内宏昭, 高橋洋志, Maxwellモデルを応用した道産中力小麦生地の発酵時における膨張シミュレーション, 寒地技術論文・報告集, pp.61-65, 第23巻, 2007, 査読有.
- ⑪ Kawai, H., Kikura, H. and Takahashi, H., “Spectrum Analysis of the Taylor Vortex Flow with a Short Annulus Using the Ultra Sonic Velocity Profiler”, Proc. FEDSM2007, 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, ASME, No.37238, CD-ROM, 2007, San Diego, USA, 査読有.

[学会発表] (計16件)

- ① 阿部裕貴, 河合秀樹, 高橋洋志,  $As^*$  外比の小さいTaylor-Couette渦による固液混合相の濾過実験, 日本機械学会北海道支部第47回講演会講演概要集No.082-2, pp.65-66, 2008.
- ② 小林広精, 河合秀樹, 高橋洋志, 低 $As^*$  外比固液混相流Taylor渦の超音波による速

度計測, 日本機械学会北海道支部第47回講演会講演概要集No.082-2, pp.63-64, 2008.

- ③ 長井明寛, 河合秀樹, 高橋洋志, 低 $As^*$  外比Taylor渦の数値解析と可視化実験による振動特性について, 日本機械学会北海道支部第47回講演会講演概要集No.082-2, pp.61-62, 2008.
- ④ 河合秀樹, 安井砂雄, 新部智由, 高橋秀治, 木倉宏成, 有富正憲, 光合成微生物を含む低 $As^*$  外比TVFの流れ場計測, 可視化情報学会全国講演会講演要旨集, 2008.
- ⑤ 安井砂雄, 木倉宏成, 河合秀樹, Taylor-Couette 渦流れ内における光合成微生物の培養実験, 第36回可視化情報シンポジウム講演論文集, 2008.
- ⑥ 新部智由, 木倉宏成, 河合秀樹, 超音波を用いた孤立混合領域の測定, 第36回可視化情報シンポジウム講演論文集, 2008.
- ⑦ 河合秀樹, 小林広精, 長井明寛, 高橋洋志, Taylor-Couette流れの粒子挙動のシミュレーションと超音波計測, 化学工学会第40回秋季大会研究発表講演要旨集, 2008.
- ⑧ 賀集拓, 河合秀樹, 高橋洋志, Taylor-Couette 渦流れ内培養における光合成微生物の光合成能力と増殖特性, 第17回化学工学・粉体工学研究発表会講演要旨集, pp.26-29, 2008.
- ⑨ 中村渉, 河合秀樹, 高橋洋志,  $As^*$  外比の小さいTaylor-Couette渦による固液混合相の濾過実験, 第17回化学工学・粉体工学研究発表会講演要旨集, pp.22-25, 2008.
- ⑩ 菊池拓矢, 河合秀樹, 高橋洋志, 数値解析と可視化実験によるTaylor渦の流体解析, 第17回化学工学・粉体工学研究発表会講演要旨集, pp.18-21, 2008.
- ⑪ 河合秀樹, 新部智由, 高橋洋志, 木倉宏成, 低 $As^*$  外比Taylor渦内における微粒子軌道の発現とその超音波計測, 可視化情報学会全国講演会講演要旨集, B104, 2007.
- ⑫ 安井砂雄, 河合秀樹, 高橋洋志, 光合成微生物の低 $As^*$  外比Taylor渦による培養実験, 日本機械学会北海道支部第46回講演会講演概要集, pp.71-72, 2007.
- ⑬ 菊池拓矢, 河合秀樹, 高橋洋志, 数値解析を用いたTaylor渦の流体解析, 化学工学会第39回秋季大会研究発表講演要旨集, S122, 2007.
- ⑭ 賀集拓, 河合秀樹, 高橋洋志, Taylor-Couette渦流れにおける増殖特性, 化学工学会第39回秋季大会研究発表講演要旨集, 2007.
- ⑮ 中村渉, 河合秀樹, 高橋洋志,  $As^*$  外比の小さいTaylor渦による固液混合相の濾過実験, 化学工学会第39回秋季大会研究発表講演要旨集, 2007.

- ⑩ 新部智由, 河合秀樹, 高橋洋志, UVPおよびUTDCを用いたアスペクト比の小さいTaylor渦の速度計測, 日本混相流学会年会講演論文集, 2007.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河合 秀樹 (KAWAI HIDEKI)  
室蘭工業大学・工学部・准教授  
研究者番号 : 20292071

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

以上