

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	邪魔板付流下液膜式マイクロリアクターの物質移動促進効果に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	石河秀明
Author(English)	Hideaki Ishikawa
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11785号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:吉川 史郎,大川原 真一,関口 秀俊,谷口 泉,森 伸介,青木 才子
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11785号, Conferred date:2022/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of Graduate major in	応用化学 応用化学	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 (工学) Doctor of
学生氏名： Student's Name	石河 秀明		指導教員 (主)： Academic Supervisor(main)	大川原 真一 特任教授
			指導教員 (副)： Academic Supervisor(sub)	吉川 史郎 准教授

### 要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters )

流下液膜式マイクロリアクターは、気液界面積が極めて大きいという特徴を有することから ( $\sim 20,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ )、高速の気液間物質移動を必要とする多くの気液反応に適用されてきた。しかし、迅速反応系では液側の物質移動がなお律速となり、反応領域は気液界面近傍に限られていた。そこで本研究では、微細な邪魔板で構造化した反応プレートを開発し、邪魔板の幾何学的条件が、液膜の流動、物質移動、反応転化率に及ぼす影響を実験および CFD シミュレーションにより検討した。交互に傾斜させた邪魔板が極めて薄い流下液膜内でも旋回流を発生させ、表面更新により物質移動と反応を促進させることを明らかにした。さらに、邪魔板の間隔と高さが旋回流に大きな影響を及ぼす設計変数であることを示した。

本論文は計 5 章で構成している。

第 1 章「緒論」では、マイクロリアクターの特徴、適用事例、研究動向の変遷について概観し、その実プロセスへの適用は未だ限定的であるものの、高機能および高付加価値の製品を生み出すための単位操作装置としての研究がなお望まれていることを明らかにした。さらに、気液マイクロリアクターの特徴と分類を示し、なかでも流下液膜式マイクロリアクターの利点、既往研究における取り組みを概説し、迅速気液反応系における液側物質移動の促進を残された課題とした。そのうえで、邪魔板を有する微細構造化プレートの提案により、気液反応のさらなるプロセス強化を本研究の目的とした。

第 2 章「邪魔板付プレートにおける流下液膜の流動」では、まず、水平邪魔板付プレート (HB プレート) における二次元流下液膜流れを実験と CFD シミュレーションにより、網羅的に検討した。VOF 法を組み込んだ CFD モデルの妥当性は、開発した手法で実験的に可視化した流下液膜表面の波状形状と、同条件のシミュレーションで予測された波状形状が定性的に一致することにより確認した。さらに、次元解析により波状流下液膜流れの振幅と平均厚さの無次元予測式を提案した。また、HB プレートにおける気液界面の波打ちは、(i) 高い邪魔板高さ、(ii) 大きな流量、(iii) 低粘度および低表面張力を有する流体、などの設計および操作によって誘起されることを明らかにした。さらに、傾斜邪魔板付プレート (IB プレート) における三次元流下液膜流れの CFD シミュレーションにより、薄い液膜内であっても旋回流が起これ、物質移動の促進が期待されることを明らかにした。

第 3 章「邪魔板付プレートにおける流下液膜の物質移動」では、邪魔板付プレートの物質移動促進効果を三次元 CFD シミュレーションにより網羅的に検討した。系として二酸化炭素の水への物理吸収を選定した。流下液膜への二酸化炭素物理吸収をシミュレーションするために開発した CFD モデルの妥当性は、二次元解析解との比較により確認した。HB プレート上では、設計条件によらず、邪魔板のない標準プレートと比較して液側の平均二酸化炭素濃度に基づく物質移動係数  $k_L$  がわずかに小さくなることを明らかにした。一方、IB プレートの  $k_L$  は、標準プレートや HB プレートと比較して大幅に増加することを明らかにした。IB プレートで相間物質移動が促進されるのは、傾斜邪魔板に誘起される旋回流で気液界面において表面更新が起こるためと考えた。加えて、パラメータスタディにより、とくに邪魔板間隔と邪魔板高さが  $k_L$  を高めるための重要な設計パラメータであることが明らかにした。標準プレートと比較して、邪魔板間隔を短くした条件、邪魔板高さを高くした条件において  $k_L$  が大幅に増加することを示した。

第 4 章「邪魔板付プレートにおける流下液膜の反応吸収」では、水酸化ナトリウム水溶液への二酸化炭素反応吸収について、実験および CFD シミュレーションにより邪魔板付流下液膜式マイクロリアクターの挙動を検討した。化学反応を含む CFD モデルを新たに構築し、実験結果との比較を通してその妥当性を確認した。HB プレートにおける水酸化ナトリウムの反応転化率は、設計に関わらず標準プレートのそれと比較して微減することを明らかにし、二次元構造の水平邪魔板では反応吸収促進に限界があることを示した。一方、IB プレートにおける反応転化率は、標準プレートのそれよりも大幅に増加し、傾斜邪魔板に反応吸収を促進する効果があることを示した。第 5 章「総括的結論」では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の展望について言及した。

本研究の成果は、流下液膜式マイクロリアクターにおけるさらなる気液反応のプロセス強化に貢献し、様々な反応へ適用されることが期待される。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)  
Doctoral Program

## 論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： 応用化学 系  
Department of Graduate major in 応用化学 コース  
学生氏名： 石河 秀明  
Student's Name

申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学)  
Academic Degree Requested Doctor of  
指導教員 (主)： 大川原 真一 特任教授  
Academic Supervisor(main)  
指導教員 (副)： 吉川 史郎 准教授  
Academic Supervisor(sub)

### 要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words )

Falling film microreactors have been applied to fast exothermic gas-liquid reactions by taking advantage of extremely large interface area. However, in such reaction systems, the reaction rate is often limited by mass transfer on the liquid side. In this study, for process intensification, microstructured falling film plates with micro-baffles were newly proposed and the effect was investigated in terms of hydrodynamics, mass transfer and reaction.

First, 2-dimensional falling film flows on microstructured plates with horizontal baffles (HB plates) were experimentally and numerically investigated. It was suggested that the guidelines to enhance mass transfer for HB plates were (i) higher baffle height, (ii) higher flowrate, (iii) lower viscosity/surface tension. Then, 3-dimensional flows on plates with alternately inclined baffles (IB plates) were numerically investigated. Swirling flow was observed downstream of the inclined baffle, which was expected to promote mass transfer.

Subsequently, the effect of micro-baffles on mass transfer was numerically investigated. CO<sub>2</sub> gas absorption into water was selected as a benchmark study. On the HB plates, the liquid-side mass transfer coefficient  $k_L$  was slightly smaller than that on the standard plate without micro-baffles regardless of geometrical parameters. On the other hand, on the IB plates,  $k_L$  was significantly increased. It was found that inclined baffle-induced swirling flow promoted surface renewal in a falling film. In addition, parametric studies indicated that shorten baffle interval and higher baffle height could greatly raise  $k_L$ .

Finally, the reaction behavior was investigated on CO<sub>2</sub> gas absorption into NaOH aqueous solution in a falling film microreactor. A CFD model involving chemical reactions was successfully validated through the comparison with experimental results on the standard and HB plates. The CFD simulations indicated that inclined baffles significantly increased reaction conversion of hydroxide.

The outcome of this study will contribute to further process intensification of gas-liquid reactions in falling film microreactors.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).