



Process design of solid-liquid mixing in agitated vessels based on transport phenomena

越智, 友亮

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2022-03-25

(Date of Publication)

2023-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8361号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1008361>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(様式3)

論文内容の要旨

氏 名 越智 友亮

専 攻 応用化学 専攻

論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記すること。)

Process design of solid-liquid mixing in agitated vessels based on transport phenomena

移動現象論に基づいた固液攪拌槽プロセスの設計に関する研究

指導教員 大村 直人 教授

A chemical plant consists of many kinds of organically linked basic operations, so-called unit operations. Even in the recent chemical industries, where digital technologies have streamlined chemical plants, the performance of each unit operation dominates the productivity of the whole of a chemical plant. Mixing is one of the most common unit operations in various chemical processes, and the mixing device deals with several functions simultaneously. The conventional agitated vessel is one of the most commonly-used mixing devices, which contains a rotating impeller, baffles, a jacket or a coil for thermal control, and other measurement instruments. Furthermore, the agitated vessel often plays a principal role in the processes as a reactor due to the large throughput and high performance in physical transfer. In addition, the agitated vessel is used supplementary in pretreatment and after-treatment processes. Consequently, the agitated vessel deals with the fluid flow with different properties, including multiphase flows, which leads to a wide variety of requirements for processes in the agitated vessel. In addition, although the operation of an agitated vessel process looks simple, such as filling up the vessel with the working fluid and rotating the impeller, but is actually not. The complicated transport phenomena and distribution of physical values lead to difficulties in designing processes using the agitated vessel. Hence, the optimal design of a mixing tank is essential for the successful performance of the process in the vessel to accomplish an appropriate hydrodynamic state which directly impacts the physical transport, process efficiency, and product quality.

Many industries deal with solid-liquid multiphase processes in the agitated vessel, such as agglomeration of solid particles, mineral treatment, crystallization, preparation of the slurry, and synthesis of chemicals using catalysts. The dissertation is devoted to resolving two issues in practical solid-liquid processes using agitated vessels and providing beneficial guidelines to design processes and geometrical configuration of the equipment. One issue is the need for the representative shear rate in an agitated vessel to describe the agglomeration process effectively. The spatial distribution of the shear rate in a vessel leads to difficulty assessing the agglomeration behavior of suspended particles. Another issue is scaling on the vessel wall around baffles. Although the scaling is a complex phenomenon including heat and mass transfer near the vessel wall, the discussion in previous studies had been limited in the velocity magnitude near the wall. Therefore, in the approach of controlling the hydrodynamics, transport phenomena near the vessel wall must be investigated in detail to understand and suppress scaling on the wall.

This doctoral dissertation consists of five chapters. Chapter 2 investigated a particle agglomeration process in an agitated vessel with a wide shear distribution. Chapters 3 and 4 studied the scaling process in the baffled agitated vessel and discussed the effect of clearance between baffles and the sidewall of the vessel. Each chapter can be summarized as follows, respectively.

Chapter 1 provided the general introduction about the agitated vessel as one of the devices for mixing operation and summarized physical phenomena and mechanical components in an agitated vessel. Subsequently, presenting some issues in the solid-liquid process in the agitated vessel, chapter 1 described the objective and outline of this dissertation.

Chapter 2 dealt with a particulate process in an agitated vessel. The shear rate significantly dominates the

orthokinetic agglomeration and breakage of solid particles in an agitated vessel. Thus, the impeller agitation should provide appropriate shear for success in the process. However, physical values, including shear rate, typically have spatial distribution, leading to difficulty estimating the representative value. This chapter proposed a new representative shear rate which took shear history of particles into account as a weighted average shear rate based on the local residence time. The applicability of the offered representative shear rate for a Rushton turbine was investigated using a simplified model of the agglomeration behavior of solid particles. It was shown that the proposed representative shear rate could successfully predict agglomeration behavior in the vessel. This chapter also concluded that the representative shear rate by Metzner and Otto provided better estimation when particle concentration was small, and the rotational speed of the impeller was low.

Chapter 3 numerically analyzed the friction factor at the sidewall of the baffled vessel in the turbulent regime. Considering the Chilton-Colburn analogy, the friction factor directly impacts the heat and mass transfer near the vessel wall. Most of the research numerically investigating turbulent flow in an agitated vessel often focused on the flow velocity distribution far from the wall. Thus, this chapter first validated the near-wall velocity obtained by the used turbulent model, $k-\omega$ SST model. The friction velocity at the sidewall was calculated from the numerically obtained normal gradient of tangential velocity. Then, the universal velocity profile near the sidewall using a paddle impeller was compared with the model proposed by Hiraoka *et al.* (2007) and showed good agreement. At the sidewall of the vessel agitated by a MAXBLEND[®] impeller, a large value of the friction factor was obtained in the range with a strong discharge flow. On the other hand, the friction factor was smaller in the other vertical range. The friction factor drastically increased by adding baffle clearance, especially around baffles. This result implied that baffle clearance could reduce scale on the vessel wall there. In addition, a large scale of the fluctuation of friction factor was found, which may lead to the further enhancement of the heat and mass transfer.

Chapter 4, as a verification of the consequence in chapter 3, experimentally investigated the effect of the baffle clearance in a practical process to overcome the issue of material deposition on the wall of the vessel. The production reaction of magnesium hydroxide was conducted as a model of scale formation in a baffled vessel agitated by a MAXBLEND[®] impeller. The increase in rotational speed of the impeller suppressed scale growth both in cases with and without baffle clearance. In the case without baffle clearance, the numerical simulation showed the flow impingement on baffles, which enhanced the removal of the scale deposition. In contrast, the lower velocity magnitude behind the baffles resulted in the formation of more scale in amount. Installation of baffle clearance caused contraction flow between the vessel wall and baffles, and, consequently, higher flow velocity reduced the scale deposition there. Measurement of torque of the rotating impeller showed that the installation of baffle clearance did not reduce energy consumption. However, from the viewpoint of operating cost and process safety, it can be a promising approach to improve process efficiency.

Chapter 5 gave conclusive remarks of Chapter 2–4 and suggested some potential future works.

氏名	越智 友亮		
論文 題目	Process design of solid-liquid mixing in agitated vessels based on transport phenomena (移動現象論に基づいた固液攪拌槽プロセスの設計に関する研究)		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	大村 直人
	副 査	教 授	鈴木 洋
	副 査	教 授	浅野 等
	副 査	准教授	菰田 悦之
要 旨			
<p>混合は種々のプロセスにおける最も基本的な単位操作であり、混合装置は化学反応、熱交換、分離などのいくつかの機能を同時に果たす。攪拌槽は、工業プロセスの中で最も一般的に使用されている混合装置の一つであり、攪拌翼、バッフル、熱制御用のジャケットまたはコイル、および他の測定機器から構成されている。この攪拌操作は非常に単純に見えるが、攪拌槽内の運動量、熱、物質の移動現象は非常に複雑であり、この複雑な移動現象が攪拌槽を用いたプロセス設計を困難にしている。本論文では、この複雑な移動現象を伴う攪拌槽のプロセスの中で、固液攪拌プロセスに着目して攪拌槽内で起こる微粒子の凝集・分裂を伴う複雑な移動現象と、攪拌槽の幾何学的形状が攪拌槽壁に付着するスケールや攪拌槽壁面での熱・物質移動に及ぼす効果を流体力学的に明らかにすることで、攪拌槽を用いた固液攪拌プロセスを精緻に設計するための指針を得ることを目的としている。</p> <p>第1章では、混合操作のための装置の一つである攪拌槽について概説し、攪拌槽内の物理現象および機械的構成要素についてまとめている。つぎに、攪拌槽内の固液プロセスにおけるいくつかの問題点を提示し、本論文の目的と概要を説明している。</p> <p>第2章では、攪拌槽を用いた微粒子プロセスを取り上げている。攪拌翼の回転による流体のせん断速度は混合槽中の固体粒子の凝集と分裂を支配しており、適切なせん断が微粒子プロセスの設計・操作には極めて重要である。しかし、せん断速度を含む物理的な値は、典型的には攪拌槽内で空間分布を持ち、代表値を推定することが困難である。このことから、本章では、攪拌槽内の粒子凝集の代表的なせん断速度を、局所滞留時間に基づく加重平均せん断速度として提案している。固体粒子の凝集挙動の単純化モデルを用いて、Rushton タービンに対して、今回提案した代表せん断速度の適用性を調べている。その結果、この代表せん断速度が微粒子の濃度が大きい場合に、凝集・分裂挙動を予測することができることを示している。また、本章では、Metzner と Otto の手法による代表的なせん断速度は、粒子濃度が小さく、攪拌翼の回転速度が低い場合に、より良い推定が得られると結論づけている。</p> <p>第3章では、バッフルが設置された攪拌槽側壁の乱流領域における流体摩擦係数を数値解析により調べている。Chilton-Colburn のアナロジーを考慮すると、攪拌槽壁上の流体摩擦係数は、槽壁近くの熱と物質移動に直接影響するが、混合槽内の乱流を数値的に調べている研究の多くは、壁面から離れた流れの速度分布に焦点を当てており、攪拌槽壁近傍における情報は極めて少ない。このため、本章ではまず、使用した乱流モデル $k-\omega$ SST モデルによって得られた壁近傍の速度を検証している。つぎに、数値的に得られた接線速度の正規勾配から側壁での摩擦速度を計算し、パドル翼を用いた側壁近傍の普遍的速度分布が、平岡らが提案したモデルと良好に一致することを示している。MAXBLEND®翼を用いた場合、槽側壁では、攪拌翼下部の強い吐出流が衝突する領域で大きな流体摩擦係数の値が得られることを見出している。一方、他の鉛直範囲では、流体摩擦係数は比較的小さいことも示している。バッフルと槽壁の間にクリアランスを設置することにより、流体摩擦係数はバッフル周辺で著しく増加することも明らかにしている。さらに、流体摩擦係数の大きな時間変動が見られ、この変動が熱と物質移動のさらなる促進につながる可能性があることを指摘している。</p> <p>第4章では、第3章で得られた知見を生かし、攪拌槽壁へのスケールの堆積の問題を克服することを目</p>			

氏名	越智 友亮
<p>的として、攪拌槽に設置されるバッフルの側壁とのクリアランスが攪拌槽壁面に付着するスケールに及ぼす影響を実験的および数値的に調べている。水酸化マグネシウムの生成反応を、MAXBLEND®を攪拌翼として用い、スケール形成のモデル反応として行っている。攪拌翼の回転速度の増加は、バッフルと攪拌槽壁とのクリアランスの有無にかかわらず、スケール成長を抑制することを明らかにしている。バッフルと攪拌槽壁とのクリアランスのない場合、数値シミュレーションにより、バッフル前方での衝突流がスケール堆積の除去を強化することを示している。一方、バッフル後方の流速が遅いよみ領域で、より多くのスケールの形成をもたらすことを示している。バッフルと攪拌槽壁の間にクリアランスを設置することで、槽壁とバッフル間で縮流を引き起こし、この縮流によるより速い流速がスケール堆積を効果的に減少させることを見出している。攪拌翼の回転トルクを測定した結果、バッフルと攪拌槽壁の間にクリアランスを設けても、所要動力に顕著な減少はもたらさなかったが、バッフルと攪拌槽壁の間のクリアランスは攪拌槽壁におけるスケールの付着量を軽減することができるため、運転コストとプロセスの安全性の観点からプロセス効率を改善するための有望なアプローチとなり得ると結論づけている。</p> <p>第5章では、第2章から第4章の結論を述べ、本研究の成果を踏まえて将来の研究の方向性について議論して、本論文のまとめとしている。</p> <p>以上、本研究は攪拌槽内のせん断速度が固体微粒子の凝集・分裂に及ぼす影響と、攪拌槽に設置されるバッフルに着目した攪拌槽の幾何学的形状が攪拌槽壁上の移動現象に及ぼす影響を実験的および数値的に詳細に調べている。粒子凝集を支配する代表的なせん断速度を局所滞留時間に基づく加重平均せん断速度として、固体粒子の凝集挙動のモデル化を行い、そのモデルが工業的に重要な微粒子の濃度が大きい場合に、凝集・分裂挙動を予測することができることを明らかにしていることや、バッフルと槽壁の間に設置したクリアランスの攪拌槽壁の移動現象に及ぼす効果を明らかにし、このクリアランスがプロセスの効率を改善するための有望なアプローチとなり得ることを見出しており、今後の攪拌槽を用いた固液攪拌プロセスの精緻な設計のための指針となるべき重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の越智友亮は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>	