

第5節 公転自転式攪拌脱泡装置の運転条件とその効果について

(株) 写真化学 中村 友紀

はじめに

90年代に入り、電子部品の小型化に伴い、電子材料の精密攪拌と攪拌時に混入する気泡の高精度な脱泡が求められるようになった。弊社ではそのニーズに応えるべく、精密な攪拌と脱泡の同時処理を可能にする、汎用性・耐久性に優れた工業用攪拌脱泡装置の開発に着手し、1992年に弊社の公転自転式攪拌脱泡装置（現：カクハンター）が誕生した。以降、進化を続ける攪拌材料に対応するため、日々研究を重ね技術を進化させてきた。

本節では、公転自転式攪拌脱泡装置の原理や攪拌と脱泡の事例を交えながら「カクハンター」の技術を紹介する。

1. 各種攪拌方法の特徴

攪拌方法は種々あるため、用途に合わせて選択する必要がある。攪拌方法の代表的な例として、攪拌翼の回転により発生した槽内の流れで攪拌するプロペラ式、ロール間の圧力とロール速度差によるせん断力で攪拌する3本ロール式、容器の回転により発生した渦（流れ）で攪拌するローラー式、容器を傾けて公転と自転を同時に与えることにより発生する渦（流れ）とせん断力で攪拌する公転自転式が挙げられる。その中でも公転自転式は、短時間で攪拌と脱泡を同時に処理することが可能であり、また材料変更時は容器を交換するだけで手間がかからないため、特に多品種の材料を扱う研究分野で多く使用されている。

表1 各種攪拌方式の特長

方式	プロペラ式	3本ロール式	ローラー式	公転自転式
攪拌時間	比較的短時間	長時間	長時間	短時間
材料粘度	低～中粘度	中～高粘度	低～中粘度	低～高粘度
脱泡	不可	ロール間圧力	不可	遠心
外部からの異物混入	混入の可能性あり	混入の可能性あり	容器密閉のためほぼなし	容器密閉のためほぼなし
材料変更時の手間	洗浄必要	洗浄必要	洗浄不要	洗浄不要
処理量	大量処理可能	連続処理可能	大量処理可能	容器容量に依存

2. 公転自転式攪拌脱泡装置の技術

本項では、公転自転式攪拌脱泡装置における攪拌と脱泡の原理について説明する。図1～4は、それぞれの材料姿勢を可視化できるように2色の小麦粘土を使用し、中央で切断した断面写真とそのイラストである。

図2のように材料の入った容器が傾斜した状態で公転の回転のみを与えた場合、発生する遠心力により容器内の材料は公転の円周方向の容器側壁に押し付けられる。一方、図3のように材料の入った容器が傾斜した状態で自転

の回転のみを与えた場合、発生する遠心力により容器内の材料は自転の円周方向の容器側壁に押し付けられ、渦巻状の流れを発生させる。図4のように材料の入った容器が傾斜した状態で公転と自転の回転を同時に与えた場合、複雑な上下対流が発生し攪拌脱泡される。

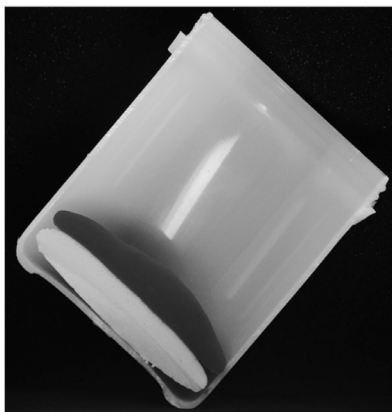


図1 攪拌前

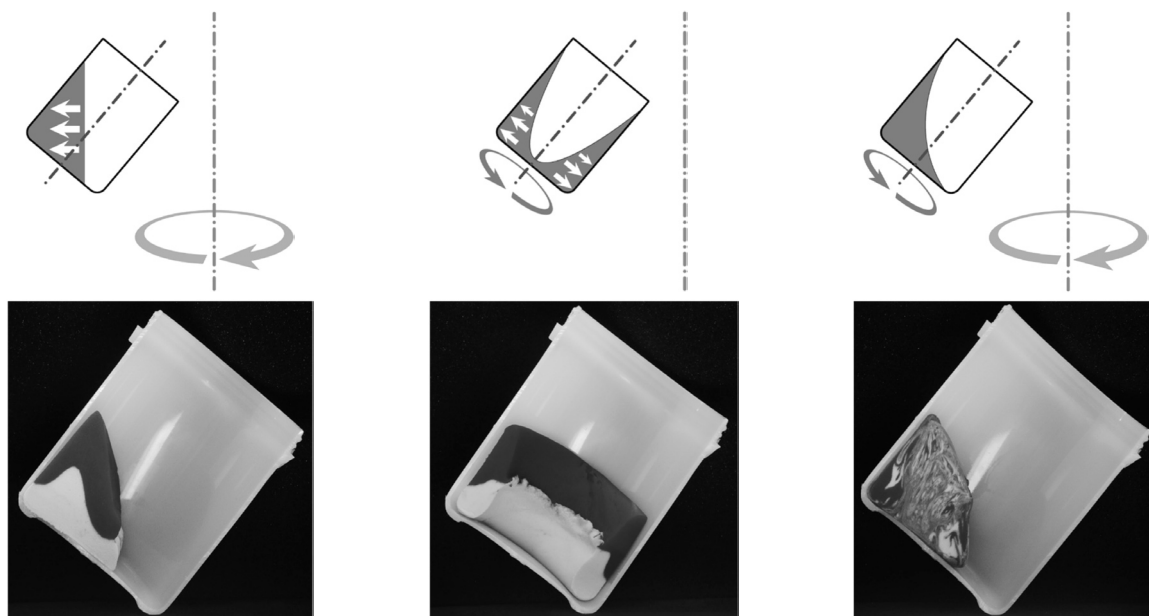


図2 公転回転のみ

図3 自転回転のみ

図4 公転と自転回転

攪拌脱泡作用は、公転と自転の遠心力における作用の相互関係によって変化する。公転の遠心力が自転の遠心力を大きく上回ると、材料を公転の円周方向の容器側壁に押し付ける効果が強まり、材料に内在する気泡が分離することと、材料の一部が容器側壁に薄く延ばされ薄膜化することにより脱泡作用が強くなる。一方、公転の遠心力に加えて自転の遠心力が強まると、渦巻状の流れや上下対流を発生させる効果が高まることで材料と容器側壁との間にせん断力が発生し、攪拌作用が強くなる。材料の流れによっては、空気の巻き込みも発生するため脱泡作用は弱くなる。

3. 公転自転式攪拌脱泡装置「カクハンター」の技術

攪拌と脱泡の作用は、公転と自転の回転数だけでなく、材料の特性や処理量、容器の形状等によっても変化する。そのため、処理目的、材料、用途等に合わせて公転と自転の回転数を適宜変更する必要がある。

弊社の公転自転式攪拌脱泡装置「カクハンター」は、公転と自転の回転数を個別に設定できるだけでなく、その設

定範囲を広く設けているため、より精度の高い処理ができるようになっている。

次項から事例を交えながら公転と自転の回転数を個別に設定できることの利点を説明する。

4. 攪拌事例

攪拌事例で使用する材料は、中心粒径 $4.8\mu\text{m}$ 、比重 3.95 のアルミナ粉体と粘度が異なる比重 0.97 のシリコーンオイル 3 種で、アルミナスラリーが 80wt% になる様それぞれの材料を計量し、攪拌している。シリコーンオイル 3 種の粘度は、1,000, 10,000, 100,000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ である。なお、攪拌状態を目視で判断するため、粉体の濃度を 80wt% と高くして差が顕著に表れるようにした。

今回のように攪拌する 2 種の材料の状態が異なり且つ比重差が大きい場合、材料の投入順も攪拌に影響を与える。先に比重の大きい粉体を投入すると、公転の遠心力で粉体が押し固められてしまうことで液体が浸透せず、攪拌作用が弱くなる。そのため、今回の実験では、液体であるシリコーンオイル、アルミナ粉体の順に投入した。

図 5, 6 は攪拌後の材料の表面状態を上から撮影したものである。図 5 のように表面に艶があり粉体の塊が見られないものを、攪拌良好 (○) と判断し、図 6 のように表面に艶が無く粉体の塊がみられるものを、攪拌不良 (×) と判断した。掲載している写真は材料表面だけであるが、内部についても粉体の塊の有無を確認している。なお、スペースの関係上すべての材料表面の写真を掲載できないため、代表的な写真のみとしている。

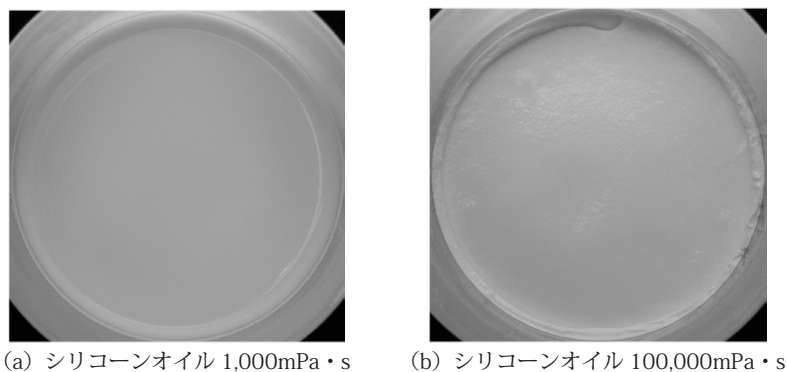


図 5 攪拌良好な材料表面

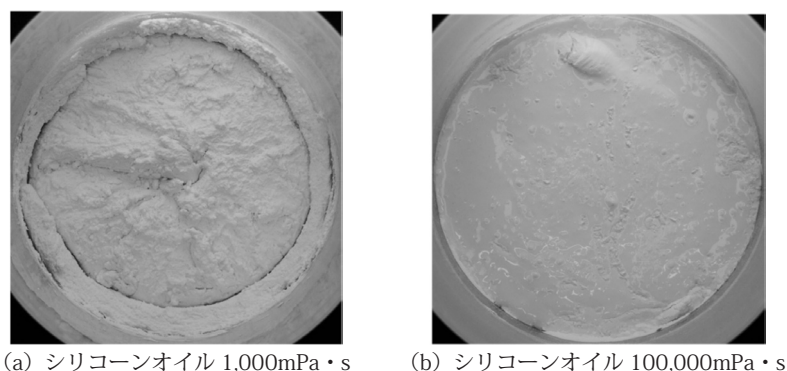


図 6 攪拌不良な材料表面

表 2 の公転の回転数が 1000rpm では、シリコーンオイルの粘度 1,000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ の場合、自転の回転数が 300rpm 以上で攪拌されているが、シリコーンオイルの粘度 10,000, 100,000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ の場合、自転の回転数を高くしてもすべて攪拌されておらず攪拌結果に変化が見られない。これに対して表 3 の公転の回転数が 1200rpm では、自転の回転数が 300rpm の場合シリコーンオイルの粘度 1,000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ のみが攪拌され、自転の回転数を 500rpm に高めるとシリコーンオイルの粘度 1,000 と 10,000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ が攪拌され、自転の回転数を 1000rpm まで高めるとシリコー

ンオイルの粘度 1,000, 10,000, 100,000mPa・s の 3 種とも攪拌されている。つまり、公転の回転数と共に自転の回転数も高めることで、粘度の高いシリコンオイルまで攪拌されるようになっている。これは、攪拌作用が公転と自転の遠心力における作用の相互関係によって変化するためである。公転の回転数を高めることで材料を公転の円周方向の容器側壁に押し付ける効果は強まるが、自転の回転数が低いままだと上下対流の発生効果は低いため攪拌されず、自転の回転数を高めると上下対流の発生効果が高くなり攪拌される。材料に適した攪拌作用になるよう、公転と自転の回転数を調整する必要がある。

表 2 公転回転数 1000rpm の攪拌結果

テスト番号	公転回転数 (rpm)	自転回転数 (rpm)	運転時間 (sec)	シリコンオイル粘度 (mPa・s)		
				1,000	10,000	100,000
1	1000	100	120	×	×	×
2		300	120	○	×	×
3		500	120	○	×	×
4		1000	120	○	×	×

表 3 公転回転数 1200rpm の攪拌結果

テスト番号	公転回転数 (rpm)	自転回転数 (rpm)	運転時間 (sec)	シリコンオイル粘度 (mPa・s)		
				1,000	10,000	100,000
5	1200	100	120	×	×	×
6		300	120	○	×	×
7		500	120	○	○	×
8		1000	120	○	○	○

今回の事例よりも公転の回転数のみをさらに高くした場合は、材料を公転の円周方向の容器側壁に押し付ける効果がさらに強まることで、材料の一部分で摩擦が増大し局所的な発熱とそれに伴う材料の変質が起こる可能性がある。また、脱泡の作用が強くなるため、比重差のある材料は分離し攪拌不良となる可能性がある。

アルミナ粉体とシリコンオイルの攪拌実験の結果から、攪拌処理を行う際は公転と自転の回転数の両方を高くすることで、粘度の異なる材料が攪拌されることを示した。

5. 脱泡事例

脱泡事例で使用する材料は、主剤（粘度：1,200mPa・s、比重：1.10）、硬化剤（粘度：300mPa・s、比重：1.01）のエポキシ樹脂で、混合比は 5：1 である。材料投入時に混入した気泡の脱泡を行う。なお、主剤、硬化剤ともにスポイトを使用して投入している。

図 7 の (a), (b), (c) は公転の回転数 1000rpm、運転時間 60 秒は共通であり、自転の回転数を 300, 1000, 2000rpm の 3 種類の条件で脱泡している。また、図 7 は硬化したサンプルをデジタルマイクロスコープで 50 倍に拡大して撮影したものである。

自転の回転数は、図 7 の (a), (b), (c) の順に高くなっており、同じ順でサンプル中の気泡の数が増加している。自転の回転数が 300rpm の時に気泡の数が少ないのは、公転の遠心力が自転の遠心力を大きく上回っており、攪拌作用に比べて脱泡作用が強くなっているためである。自転の回転数が 1000, 2000rpm の時に気泡の数が多いのは、公転の遠心力に加えて自転の遠心力が強くなっており、脱泡作用に比べて攪拌作用が強くなっているためである。攪拌作用が強くなり気泡の数が増える要因としては、渦巻状の流れや上下対流により空気を巻き込むことや混入した

気泡が微細化されることが考えられる。

エポキシ樹脂の脱泡実験の結果から、脱泡処理を行う際は自転の回転数を低くすることで脱泡されることを示した。

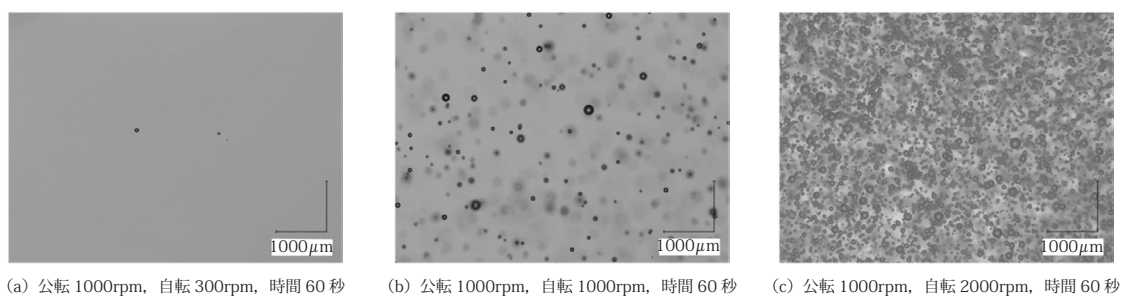


図7 サンプル内部の気泡状態

おわりに

本節の事例では、攪拌を行う際には公転と自転の回転数を高め、脱泡を行う際には自転の回転数を低くする必要性を示した。つまり、攪拌と脱泡は一つの設定では処理することができないため、公転と自転の回転数を個別に変更することが必要である。

攪拌事例で挙げた粘度以外にも、粉体や液体等の材料状態の組み合わせや、粉体の粒径やその形状、密度、帯電性およびぬれ性などの表面特性、液体のチクソ性や表面張力など、材料の条件によって攪拌や脱泡に最適な公転と自転の回転数が異なる。また、材料の混合、分散、反応、洗浄、合成、希釈等の生成プロセス、用途によっても攪拌や脱泡に最適な公転と自転の回転数が異なる。

これまでの説明のように、最適な攪拌と脱泡を行うためには、公転と自転の回転数を幅広く設定できる公転自転式攪拌脱泡装置が有用であると言える。

様々な研究分野における、導電性、絶縁性、放熱性、耐熱性、小型化、軽量化、ガスバリア性、脱溶媒など、今後ますます多様化、高機能化する材料に合わせた公転と自転の回転数が設定可能なため、公転自転式攪拌脱泡装置「カクハンター」の更なる活躍が期待できる。

