高効率蒸発撹拌装置の混合性能の評価

Evaluation of High Efficiency Evaporating Agitator

技術開発本部
プロセス技術開発部新規プロセス室
村　上　吉　明
Yoshiaki Murakami
技術開発本部
プロセス技術開発部廃棄物処理室
田　頭　成　能
Shigeyoshi Tagashira
プロセス機器事業部技術部
永　田　純　洋
Sumihiro Nagata
山　崎　忠　成
Tadashige Yamasaki

化学プロセスにおける濃縮工程において，液量が低下しても容器周囲の伝熱面を効率的に利用することが可能な装置が望まれる。当社では，逆円錐型の容器と撹拌翼を組合わせた「高効率蒸発撹拌装置」を開発した。今回，数値解析により，本装置の自由界面の上昇の確認と混合性能の評価をおこなった。その結果，本装置は撹拌によって液面を上昇させ，伝熱部が効果的に利用可能であること，およびバッフルつき反応容器と同等の混合性能を有し，混合と濃縮が同時に可能な装置であることを確認した。

The high efficiency-evaporating agitator is a device that can effectively utilize heat for concentration even if liquid decreases as concentration progresses. A comparison was made in numerical analysis in a test between the device having an inverted conical vessel, and a conventional cylindrical reactor equipped with a baffle. The test confirmed that the liquid level in the device was raised along the wall of the cone by stirring so that the heat contact area was increased. The mixing performance can be predicted to be equal in both units as the standard deviation of concentration is calculated to decrease at the same rate.

Key Words :

数　値　解　析	Numerical analysis
混　合　性　能	Mixing performance
濃縮プロセス	Condensation process

まえがき

化学プロセスの主要工程の一つとして液体の混合濃縮がある。これまでは，容器外套部にスチーム等の熱媒体を通して液体を蒸発させ，混合濃縮をおこなってきた。しかし，濃縮にともない液面が低下すると，伝熱部と液体との接触面積が減少するため，濃縮工程の効率化の阻害要因となっていた。

そこで，バッフルを持たず，撹拌による混合および液面上昇による伝熱部の有効利用が同時に可能な「高効率蒸発撹拌装置」を開発した（**図1**参照）。今回，本装置の混合性能評価を数値解析によりおこない，バッフルつき反応容器と比較した。その結果，高効率蒸発撹拌装置はバッフルつき反応容器と同等の混合性能を有することを確認したので，報告する。

1. 高効率蒸発撹拌装置の概要

高効率蒸発撹拌装置と，従来のバッフルつき反応容器との形状を**図2**，**3**に対比して示す。高効率蒸発撹拌装置は逆円錐型の形状でバッフルを持たない。そのため，以下の特長を有する。

① 少ない動力での運転が可能である。

② 液面上昇により，伝熱部が有効利用できる。

本装置は効率的な液面上昇のため，壁面を逆円錐型にしている。これによって上下の旋回流れも効率的に励起させることで混合性能を向上させることを期待するものである。本装置で従来型の反応容器と同等の混合が可能ならば，低動力での混合と，効率的な濃縮も可能な装置となる。

2. 数値計算による検討

今回，混合性能の評価を数値解析によっておこなった。使用した計算ソフトウェアは，FLUENT 6.2（FLUENT 社）であった。

計算は以下の手順でおこなった。

⑴ 撹拌時の自由表面の形状の計算

VOF モデルをもちいて，撹拌時の液面（自由表面）の形状を計算する。また，計算手法の妥当性の評価として，テスト装置（100リットル）と同一形状での計算を実施し，液面上昇の計算結果をテスト装置での実験結果と比較する。

⑵ 混合性能の比較

高効率蒸発撹拌装置と，バッフルつき反応容器との軸近傍に被混合物質を添加し，濃度の標準偏差の経時変化から混合性能を評価する。ここで，濃度の平均値は被混合物質の添加量と容器体積から，標準偏差はプロペラの軸を通過する45°ずつ傾いた４つの平面における，被混合物質の濃度から求めた。

3. 自由表面の計算結果の妥当性評価

液面上昇の計算の妥当性評価のため，テスト装置によって液面上昇確認実験をおこなった。**写真1**にテスト装置を，**図4**に計算に使用したメッシュを，それぞれ示す。撹拌翼は当社のツインスター®[1)]を

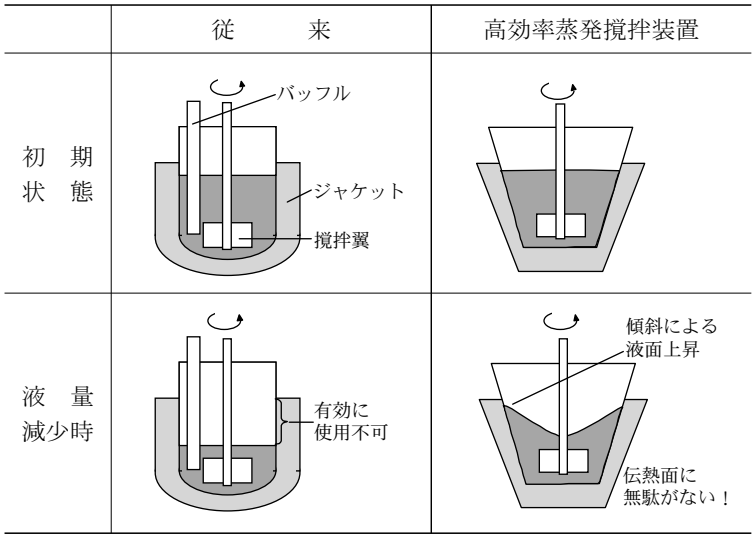

図1　高効率蒸発撹拌装置の概念

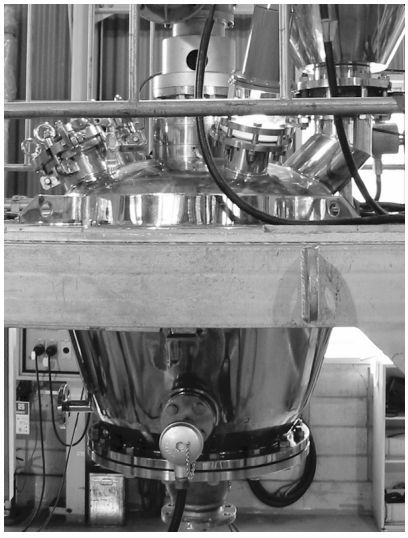

写真1　100 L テスト用装置

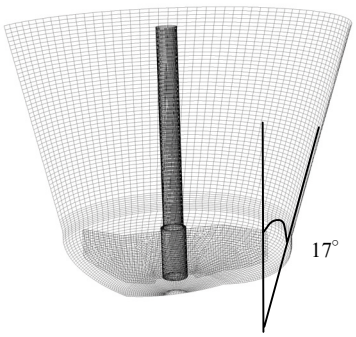

図2　高効率蒸発撹拌装置

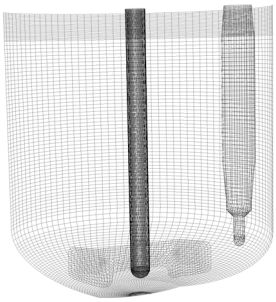

図3　バッフルつき反応容器

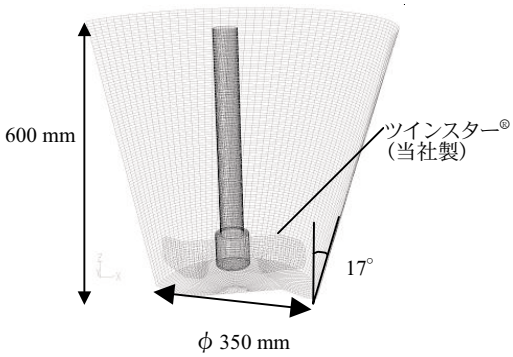

図4　100 L テスト用装置計算領域

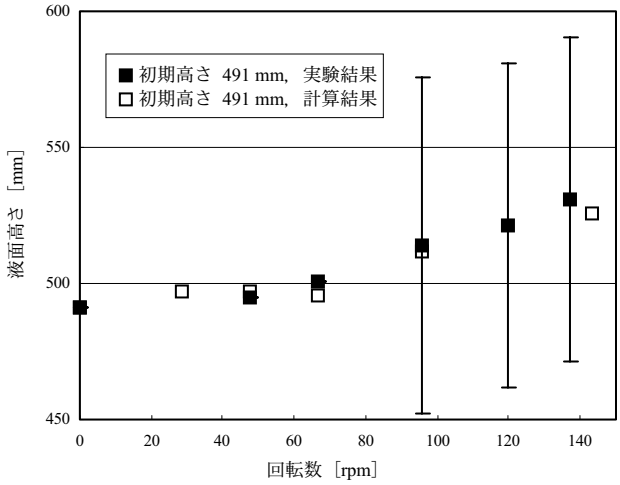

図５　計算結果と実験結果の比較

表１　運転条件

	高効率蒸発撹拌装置	バッフルつき反応容器
液　量　(L)	750	750
回転数　(rpm)	100	100
液面高さ　(mm)	804	1 038

使用しており，計算でも同様の形状を再現した。

図５に，撹拌回転数と液面高さ（液面の最外周の高さ）との関係を示す。90 rpm を超える実験値に付随するバーは，テスト装置における液面の位相による変動（スロッシング）の範囲を示している。スロッシングがある場合においては，今回計算結果との比較は液面の最大値，最小値の平均値でおこなった。

図５により，テスト装置での実験結果と計算結果が良く一致していることがわかる。この結果から，数値計算により自由界面をともなった流体の運動を表現可能と判断した。

4. 混合性能の評価

混合性能の評価は，高効率蒸発撹拌装置の実機規模（750リットル）を対象におこなった。

実機においても，撹拌翼はテスト装置同様当社のツインスター®を使用した。壁面の傾斜角は鉛直方向に対して17°傾いている。これはテスト装置と同様の値である。また，強度の向上のため，装置下部は楕円構造とした。

混合性能評価のための計算は，以下の手順でおこなった。

1)　計算メッシュ内を水で満たし，撹拌した際の自由界面の形状を求める。

2)　液面を摩擦なしの壁と見なしてその形状に合わせてメッシュを再作成する。

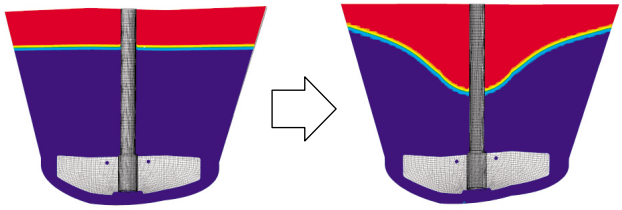

図６　撹拌による界面の変化（青：水，赤：空気）

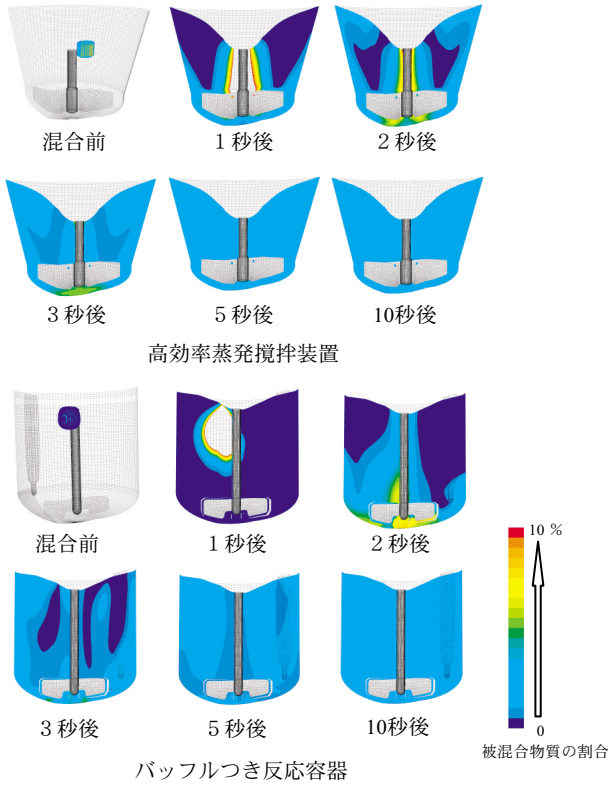

図７　混合状態の経時変化

3)　2)で作成したメッシュで，水を再度撹拌し，定常的な流れ場を形成する計算をおこなう。

4)　軸近傍に被混合物質を添加し，物質濃度の標準偏差の経時変化から混合性能を評価する。

上記の手順で，高効率蒸発撹拌装置と，従来型のバッフルつき反応容器との撹拌状況を計算した。計算条件は**表１**に示すとおりで，同一容積・同一回転数として比較した。

図６に計算前の状態，および計算により求めた自由界面を示す。撹拌翼の回転によって，液面高さは静止状態よりも約10 %上昇した。

図７に混合状態の経時変化を示す。高効率蒸発撹拌装置では，界面上昇による下向きの流れによって速やかに容器底まで被混合物質が流れ込む。底に流れ込んだ被混合物質は，撹拌翼後部の強い乱れによって混合され，さらに上下に循環する流れによって混合されていく。濃度分布は軸に垂直な断面内でほぼ

180°回転対称となった。一方バッフル付き反応容器では，下向きの流れは高効率蒸発撹拌装置と比較して小さいため，容器底に被混合物質が届くのにも1秒以上かかっている。しかし，バッフルによる回転方向の乱れが大きく，容器の外側へ高効率蒸発撹拌装置よりも速やかに被混合物質が広がっていく。バッフルを通過した後乱れによって混合され，軸に垂直な平面内での濃度分布も高効率蒸発撹拌装置と比較すると，均一となった。ただしどちらの装置でも，10秒後には均一な状態になっている。**図8**に断面における被混合物質の濃度の標準偏差の経時変化を示す。標準偏差の減少は，両方の装置でほぼ同じ値になった。このことから，両者の混合性能については，同程度であり，今回開発した高効率蒸発撹拌装置により混合は十分に可能であることがわかった。

5. 考　　察

一般に，容器内にバッフルがないと，撹拌翼と液体とが一体となって「伴回り」して，良好な混合がえられないという懸念がある。高効率蒸発撹拌装置の混合性能がバッフルつき反応容器同様の性能を示した原因として，以下の点が考えられる。

1) 大きな液面上昇を起こすような強い上下の旋回流れが発生した。これは，側壁面が逆円錐形状となっていること，装置底面を楕円構造としたことによって圧力が広い範囲に高く分布したこと，および撹拌翼と装置壁面との距離が近いことで，壁面にぶつかった流れが上向きとなったことが考えられる。

2) 液面上昇を増加させるため撹拌翼の端が壁面のすぐ近くにある。結果として撹拌翼の背面の圧力が急激に低下し，壁面付近ではく離流れが励起される。結果，撹拌翼背後における乱れの強さが上昇し混合が進んだ。

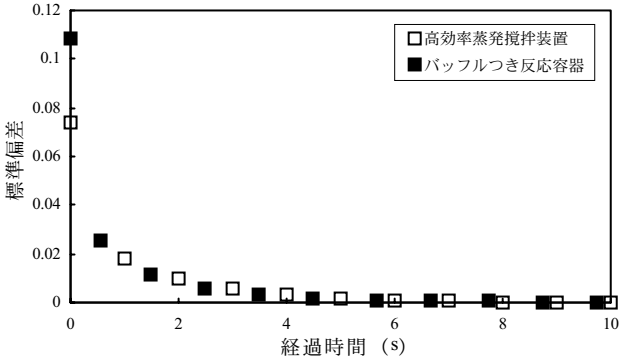

図8　標準偏差の経時変化

以上により，本装置は上下の旋回流れと強いはく離流れを併せ持つために優れた混合性能を持ち，さらに液面上昇によって伝熱面を効率的に使用可能であることが確認できた。

む　す　び

数値計算によって，高効率蒸発撹拌装置がバッフルつき反応容器と同様の混合性能を有することが確認できた。本装置をもちいれば，効率的な濃縮を混合と同時に実施でき，濃縮時間の短縮を図ることができる。

本装置がより多くの化学プロセスにおいて使用されることを期待する。

[参考文献]

1）中村隆彦，徳岡洋由：「グラスライニング製新型撹拌翼「ツインスター」」，神鋼パンテツク技報　Vol.45，No.1（2001），p.33