

スイングスター[®]の攪拌性能向上

Improvement in Agitation Performance of SWINGSTIR[®]



小川智宏*
Tomohiro Ogawa



半田裕利*
Hirotochi Handa



山本昌史**
Masafumi Yamamoto

スイングスターは独自の旋回攪拌方式により、無摺動フレキシブルシールを採用したクリーン攪拌機である。このたびユーザの攪拌性能向上のニーズに応えるため、新型の3枚テーパ翼を開発した。本稿では、3枚テーパ翼の攪拌性能、およびフレキシブルシールの洗浄性について紹介する。

Using an original swing-based mixing system, SWINGSTIR is a clean reactor which has a frictionless flexible seal. This time, a new type impeller “3-blades taper impeller” has been developed in response to user needs of improvement in agitation performance. This paper shows its agitation performance and cleanability of the flexible seal.

Key Words :

攪拌性能
コンタミレス
無摺動
洗浄性

Agitation performance
Contamination-free
Frictionless
Cleanability

【セールスポイント】

- ・攪拌性能を大幅に向上させた旋回式攪拌翼
- ・無摺動フレキシブルシールによるクリーン攪拌機

まえがき

スイングスターは非回転の旋回方式攪拌を行うことで、回転摺動部のない独自のフレキシブルシールを採用した攪拌機であり、既報¹⁾においてその構造、特長について詳述した。2012年6月に販売を開始して以来、とくに医薬、電子材料、ファインケミカル分野で好評を頂いている。

シンプルな扁平断面のビーバーテイル翼はマイルドな攪拌が可能で、洗浄性に優れた形状であるが、さらに攪拌性能向上のニーズに応えるため、新型の3枚テーパ翼を開発し、2013年10月に開催されたINCHEM TOKYO 2013に出展した。本稿ではこの3枚テーパ翼の攪拌性能、フレキシブルシールの洗浄

性を中心に紹介する。

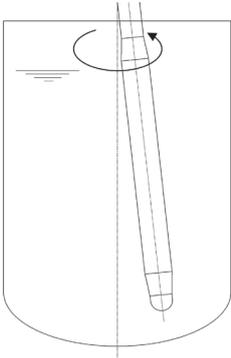
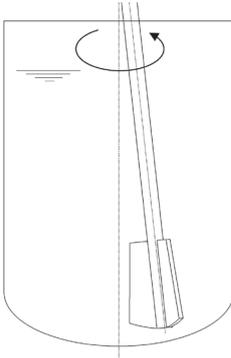
1. スイングスターの形状

1.1 基本構造

まず旋回攪拌方式を採用したスイングスターの基本構造について説明する。スイングスター反応機の断面図を図1に示す。

動力は、減速機出力軸に取付けられた偏芯伝動軸から軸受を介して攪拌軸に伝達され、この偏芯伝動軸で回転運動から旋回運動へ変換される。さらに攪拌軸は、旋回運動の支点となる球面軸受で支持され、フレキシブルシールにて缶内外を隔てている。フレキシブルシールの断面形状を図2に示す。フレキシブルシールの内面は、耐食性に優れたPTFEで

表1 スイングスター ビーバーテイル翼と3枚テーパ翼との比較

	ビーバーテイル翼	3枚テーパ翼
形状		
	パイプを扁平させた形状	上側の翼幅を小さくしたテーパ形状の3枚翼
標準攪拌動力 (水ベース)	0.05 kW/m ³	0.3 kW/m ³
翼材質	グラスライニング, ステンレス鋼, その他特殊金属	

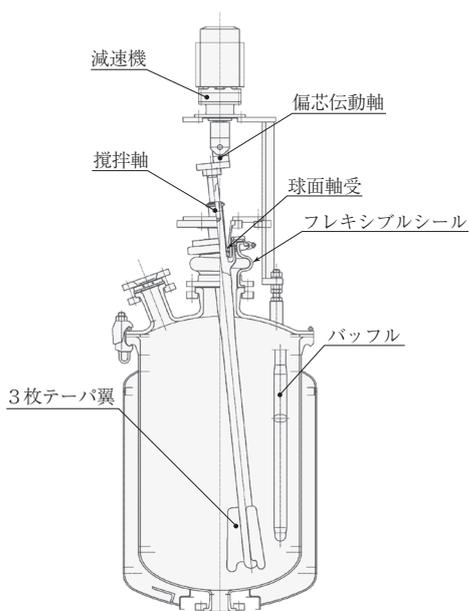


図1 スイングスター反応機

あり、その外面側には耐圧性を持たせるための補強繊維、およびそれらの層間を EPDM ゴムで充填し、可とう性をもたせた構造である。¹⁾

1.2 3枚テーパ翼

スイングスターの攪拌翼についてビーバーテイル翼と新型の3枚テーパ翼との比較を表1に示す。

ビーバーテイル翼はパイプを扁平させたシンプルな形状であったが、新型の3枚テーパ翼は、軸にテーパ形状の板翼を3枚取付けた形状とし、攪拌性

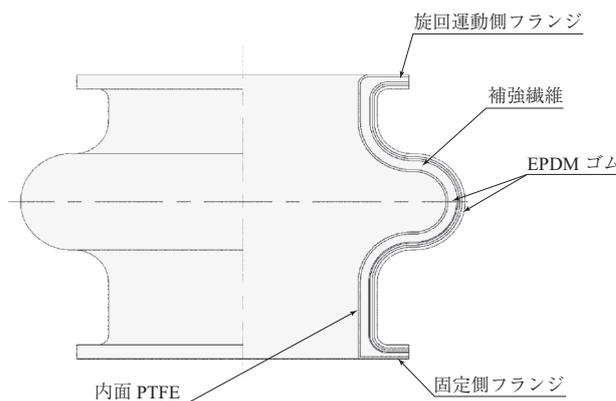


図2 フレキシブルシール

能を大幅に向上させた。また3枚テーパ翼はビーバーテイル翼と同様にグラスライニングの施工も可能である。

2. 3枚テーパ翼の攪拌性能

2.1 混合性能

攪拌性能を評価するため既報¹⁾と同形状の槽内径 $D = 400 \text{ mm}$ のアクリル製可視槽を使用し、混合試験を実施した。実験は、ヨード澱粉の呈色をチオ硫酸ナトリウムで還元脱色する脱色法を使用し、各装置の攪拌動力を同一にして混合時間を測定し比較した。ヨード溶液およびチオ硫酸ナトリウム溶液は、内容液と同じ粘度に調整したものをを用い、混合時間は、脱色過程の連続写真から決定した。

3枚テーパ翼の混合性能をオーバル3枚後退翼、および当社 GL 攪拌翼であるツインスターと比較し

た結果を写真1に示す。実験では液粘度 $0.001 Pa \cdot s$ 、液深 H は $H/D = 1.25$ の条件にて脱色の速さを比較した。3枚テーパー翼は、オーバル3枚後退翼に比べ混合速度が1.5~2倍速く、ツインスターと同等である。

また様々な液粘度にて同様に混合試験を実施し、混合時間を $n \cdot \theta m - Re$ 線図で整理し、各攪拌翼のそれと比較した結果を図3に示す。3枚テーパー翼は

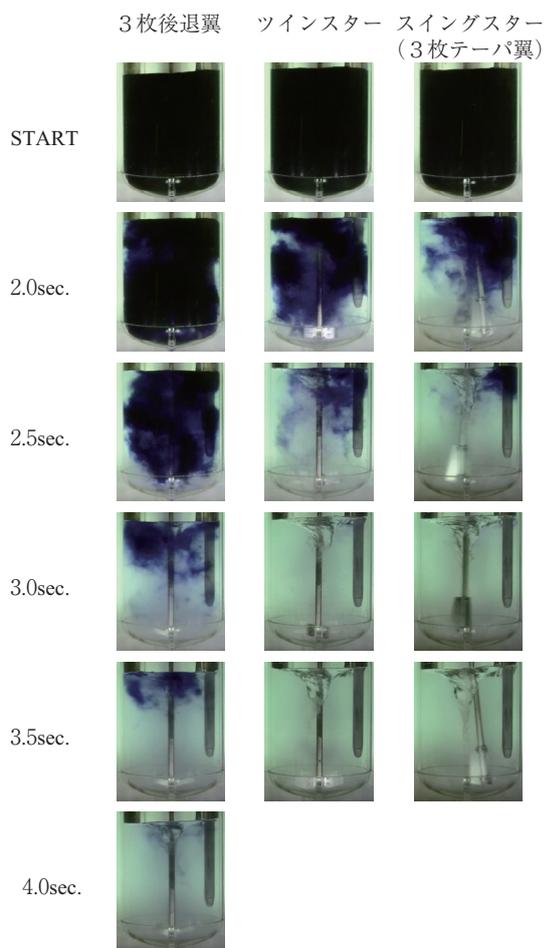


写真1 混合経過の比較

$\mu = 0.001 Pa \cdot s$ $P_v = 0.3 kW/m^3$ $H/D = 1.25$

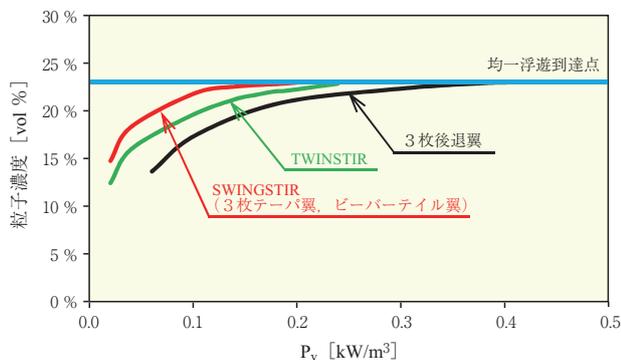


図4 粒子均一浮遊に要する動力の比較

ビーバーテイル翼よりも混合性能が大幅に向上し、ツインスターよりもさらに優れた特性を有している。

2.2 異相系攪拌特性

異相系攪拌特性の評価のため固液系、液液系2種類の攪拌実験を実施した。

固液系攪拌特性は水に粒子濃度をかさ体積23%のイオン交換樹脂を投入し、それぞれの攪拌翼について回転数を段階的に変化させて液表面近傍で粒子濃度を測定し、粒子の浮遊状態を比較した。

液液系攪拌特性は20vol%のケロシン（密度 $790 kg/m^3$ ）と水を攪拌槽に満たし、固液攪拌試験と同様にそれぞれの攪拌翼について回転数を変化させ、攪拌槽、鏡部 T.L. 近傍でケロシン濃度を測定して、液滴の分散状態を観察比較した。

固液系、液液系それぞれの攪拌特性について、単位容積当たりの動力に対し、粒子濃度およびケロシン濃度をプロットした結果を図4、5に示す。

3枚テーパー翼とビーバーテイル翼を比較すると、固液系攪拌、液液系攪拌ともに、翼の大型化により吐出が強化された3枚テーパー翼の方が低回転数で均一浮遊および均一分散が可能な結果であるが、図

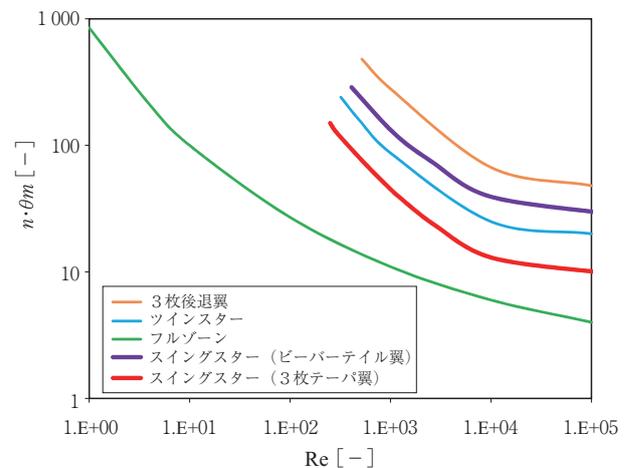


図3 $n \cdot \theta m - Re$ 曲線

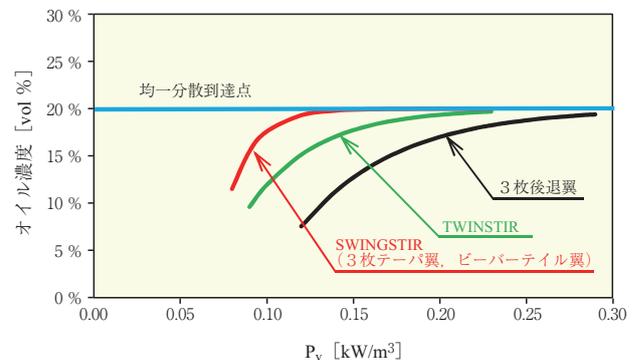


図5 液滴均一分散に要する動力の比較

4, 5の様に横軸を単位容積当たりの動力とすると、同じ特性となる結果であった。またツインスターとオーバル3枚後退翼と比較すると、3枚テーパ翼、ビーバーテイル翼ともに低動力で均一粒子浮遊、均一液滴分散が可能である。

2.3 攪拌動力

2.3.1 攪拌動力理論

既報¹⁾ではビーバーテイル翼について旋回攪拌方式が通常の回転攪拌と同様に、動力数 Np を用いて、動力を表すことができることを紹介したが、今回開発した3枚テーパ翼についても、同様に考えることができる。

図6に示す3枚テーパ翼の攪拌動力について考える。

まず1枚の翼に着目し、斜線部に発生する抗力 df ²⁾ は、抗力係数を C_D 、液密度を ρ [kg/m³] とすると

$$df = C_D A \frac{\rho u^2}{2}$$

ここで、断面積 A [m²]、速度 u [m/s] は、回転数 n [s⁻¹] とすると、

$$A = \frac{w}{2} dl \cdot |\sin \theta|$$

$$u = 2\pi n \cdot l \sin \phi$$

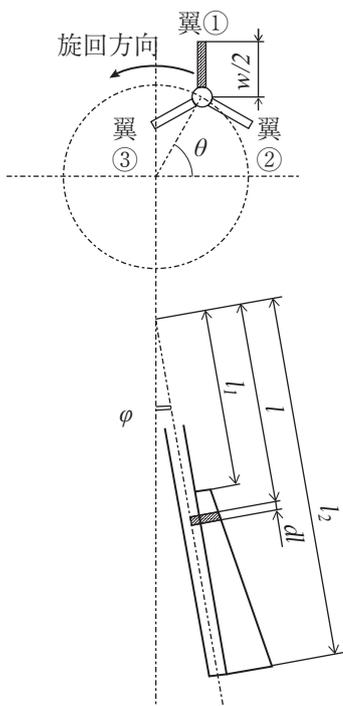


図6 旋回攪拌の動力

であるから、

$$df = C_D \left(\frac{w}{2} dl \cdot |\sin \theta| \right) \frac{\rho (2\pi n \cdot l \sin \phi)^2}{2}$$

この抗力 df により発生するトルク dT は、 $dT = (l \sin \phi) \cdot df$ で求められ、攪拌動力 dP は $dP = 2\pi n \cdot dT$ であるから、

$$dP = \frac{C_D}{2} \rho (2\pi n)^3 \cdot \sin^3 \phi \cdot \frac{w}{2} |\sin \theta| \cdot l^3 dl$$

となる。上式は翼が1枚の場合であるが、上式の翼投影幅 $\frac{w}{2} |\sin \theta|$ の部分が、翼が3枚の場合には図7に示すように旋回方位位置 θ によって変化する。この3枚翼の投影幅を仮に $w(\theta)$ とおくと、

$$dP = \frac{C_D}{2} \rho (2\pi n)^3 \cdot \sin^3 \phi \cdot w(\theta) \cdot l^3 dl$$

となり、攪拌翼全体での攪拌動力 P は、

$$\begin{aligned} P &= \int dP \\ &= \frac{C_D}{2} \rho (2\pi n)^3 \cdot \sin^3 \phi \cdot w(\theta) \cdot \int_{l_1}^{l_2} l^3 dl \\ &= \frac{C_D}{2} \rho (2\pi n)^3 \cdot \sin^3 \phi \cdot w(\theta) \cdot \frac{1}{4} (l_2^4 - l_1^4) \end{aligned}$$

ここで $w(\theta) = \zeta(\theta) \cdot d$ 、 $l_1 = \eta_1 d$ 、 $l_2 = \eta_2 d$ とすると

$$P = \left\{ \frac{C_D}{2} (2\pi)^3 \cdot \sin^3 \phi \cdot \zeta(\theta) \cdot \frac{1}{4} (\eta_2^4 - \eta_1^4) \right\} \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5$$

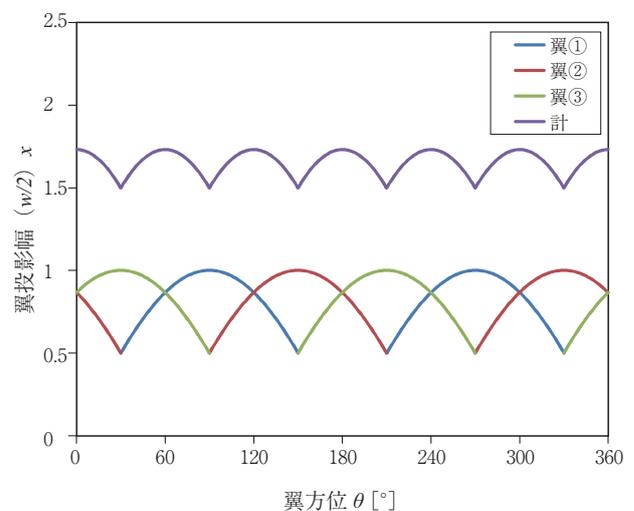


図7 3枚翼の投影幅

となる。

通常の回転攪拌による攪拌動力 $P[W]$ は、代表径（翼スパン）を $d[m]$ とすると

$$P = N_p \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5$$

と動力数 N_p をもちいて表され、動力 P は、 ρ 、 n^3 、 d^5 に比例する。

3枚テーパー翼についても回転攪拌と同様に動力数 N_p を

$$N_p = \frac{C_D}{2} (2\pi)^3 \cdot \sin^3 \phi \cdot \zeta(\theta) \cdot \frac{1}{4} (\eta_2^4 - \eta_1^4)$$

とすることで、動力推算が可能である。

2.3.2 攪拌動力理論

槽内径 $D=400\text{ mm}$ 、2:1半楕円下鏡形状の円筒槽を用いて3枚テーパー翼の攪拌動力を測定した。測定結果を $N_p - \text{Re}$ 線図として図8に示す。ここで、スイングスターの攪拌翼代表径 d は、旋回径と翼幅（翼スパン）の両方を考慮に入れるため、翼旋回投影直径の最大値とした。従来の回転型攪拌翼では $\text{Re} < 10^2$ の層流域において $N_p \cdot \text{Re}$ が一定となるが、3枚テーパー翼についても同じ傾向が確認された。

3. フレキシブルシールの洗浄性

シール部の洗浄性を評価するため、洗浄試験を実施した。実験は模擬の汚れとしてリボフラビン試薬をエタノール水溶液に溶かし、シール部分に吹き付けた後、シール部の洗浄を実施し、ブラックライトにてその残存状況を観察した。洗浄方法としては、焚上げ洗浄とスプレー洗浄の2種類の方法で実施した。焚上げ洗浄は缶内の洗浄液を加熱し発生させた

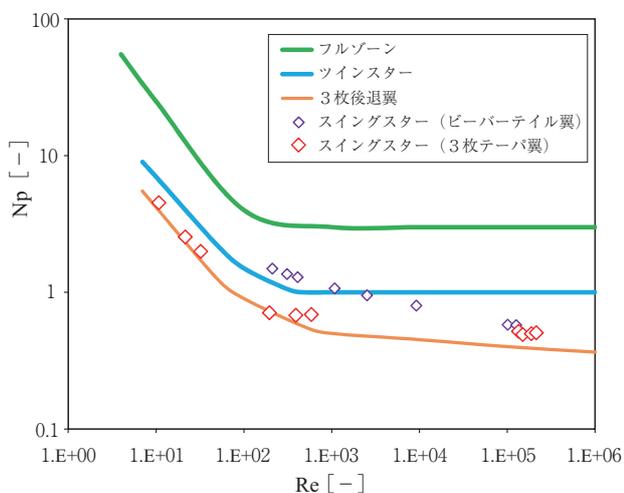


図8 攪拌動力線図 ($N_p - \text{Re}$ 線図)

蒸気で1hr洗浄、またスプレー洗浄は缶内側攪拌口下部よりスプレーノズルにて洗浄液を吹き付ける洗浄方法である。洗浄試験はスイングスターのフレキシブルシールと、比較のため代表的な回転型軸封であるドライシールについても実施した。

試験結果を表2に示す。ブラックライトによる写真において黄色に発色しているのが模擬汚れのリボフラビン試薬で、表の各シールの上段が攪拌軸、下段が攪拌口ノズルおよびフレキシブルシールを缶内側から撮影した写真である。

回転型シールでは、焚上げ洗浄後ノズル内面と攪拌軸部の汚れはほとんど洗浄されておらず、スプレー洗浄後もノズルと攪拌軸の隙間が狭いため、洗浄液がシール部まで届かず、汚れが十分に落としきれていない。このことから回転型シールではバッチ間の洗浄不良によるクロスコンタミが懸念される。

対してフレキシブルシールはシール内径と攪拌軸との隙間が広く、滞留部の無いシンプルな形状であるため、焚上げ洗浄でほとんどの汚れが落ちており、さらにスプレー洗浄を行うことで、より効果的な洗浄が可能で、非常に優れた洗浄性を有している。

またフレキシブルシールは図9のようにモータおよび減速機を取外すことなく、簡単に取付け・取外

表2 各シールの洗浄性

シール	部位	洗浄前	ブラックライト写真		
			洗浄前	焚上げ洗浄後	スプレー洗浄後
回転型シール (ドライシール)	攪拌軸				
	ノズル内面				
フレキシブルシール	攪拌軸				
	シール内面				

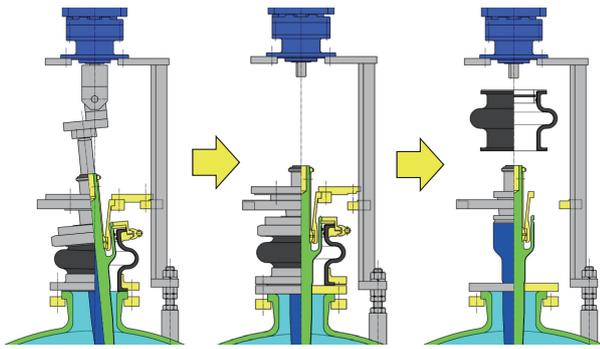


図9 フレキシブルシールの分解方法

表3 スイングスターの標準仕様（本体）

設計圧力	F.V./0.10 MPa（圧送）
設計温度	-20 - +130 ℃
適用法規	消防法
材質	ガラスライニング，ステンレス鋼，その他特殊金属（フレキシブルシール接ガス部は PTFE）

表4 スイングスター反応機の標準寸法

呼称容量 [L]	100	200	300	500
本体内径 D1 [mm]	500	600	700	800
外套内径 D2 [mm]	600	700	800	900
全高 h [mm]	1 900	2 100	2 300	3 000
最高回転数 [rpm]	135	135	117	103
モータ定格出力 [kW]	0.4	0.4	0.75	0.75

しが可能で、バッチ毎の洗浄確認や分解洗浄も容易な構造となっている。

4. 3枚テーパ翼スイングスターの特長と適用分野

【形状】

- ・ 旋回運動による攪拌で摺動部のないシール
- ・ 攪拌性能を大幅に向上させた3枚テーパ形状攪拌翼

【特長】

- ・ 3枚テーパ翼は、ツインスター、3枚後退翼よりも優れた攪拌性能を有する。
- ・ 無摺動シールによりコンタミの心配が不要。
- ・ フレキシブルシールは洗浄性が良好でクロスコンタミのリスクを大幅に低減することができる。

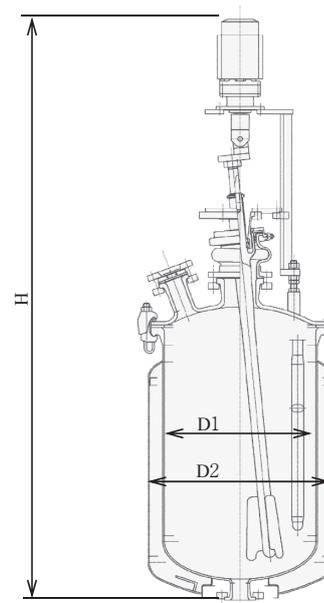


図10 スイングスター反応機の標準寸法

【適用分野】

- ・ コンタミレス，洗浄性が重視される医薬・電子材料などのファインケミカル分野

【標準仕様および参考寸法】

- ・ スイングスターの標準仕様および参考寸法を表3，4，図10に示す。

むすび

本稿ではスイングスターの新型翼である3枚テーパ翼の攪拌性能，フレキシブルシールの洗浄性について紹介した。スイングスターは，医薬，電子材料などの攪拌性能と同時にコンタミが問題となる分野に採用実績が増えてきており，今後，ユーザ製品のさらなる高付加価値化に対する問題解決につながれば幸いである。

今後もユーザのニーズに応じた製品の開発，改良を行い，ユーザ各位の製品品質の向上，生産性の向上に役立ちたいと考える。

【参考文献】

- 1) 小川智宏ほか：神鋼環境ソリューション技報 vol.9, No.2 (2013), p.34
- 2) SHINJI NAGATA：MIXING Principles and applications (1975), p.8

*プロセス機器事業部 技術部 開発グループ **プロセス機器事業部 技術部 GL 設計グループ