

無摺動クリーン攪拌機『スイングスター[®]』

Frictionless Clean Reactor “SWINGSTIR”

[特許出願中, 登録商標] [Patent Pending and Resistered Trademark]



小川智宏*
Tomohiro Ogawa



山本昌史*
Masafumi Yamamoto

近年、医薬品・ファインケミカル分野では、品質の向上およびさらなる高純度化の目的で異物混入のリスクのない攪拌機が望まれている。『スイングスター』は独自の旋回攪拌方式により、従来の回転型シールに代わる新開発の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。

Recently, in pharmaceutical and fine-chemical markets, the need for reactors which further reduce the risk of contamination is increasing. Using an original swing-based mixing system, “SWINGSTIR” is a clean reactor which has a newly developed frictionless flexible seal that replaces a conventional rotating type seal.

Key Words :

コンタミレス, コンタミフリー	Contamination-free
無摺動	Frictionless
洗浄性	Cleanability

【セールスポイント】

- ・無摺動フレキシブルシールによるクリーン攪拌機
- ・洗浄性を考慮したシンプルな旋回式攪拌翼

まえがき

近年、国内の医薬、電子材料、ファインケミカルメーカーは、より付加価値の高い製品を開発し、製造する方向に向かっている。このような製品の生産において攪拌機は、反応、晶析、濃縮などの用途で幅広く使用されている。当社もガラスライニング製攪拌機、耐食金属製攪拌機、粉体混合乾燥機を中心

に、これまでも攪拌翼の開発^{1), 2)}、ライニング用ガラスの開発、付属品の改良などにより、コンタミレスのニーズに対応してきた。

スイングスターは、従来型攪拌機の軸封部からのコンタミ防止を目的に、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る。フレキシブルシール

表1 各軸封シールの比較

	メカニカルシール	ドライシール	マグネットシール	フレキシブルシール
異物混入のリスク	×	×	×	○
洗浄の容易さ	×	×	×	○
密封性	○	△	○	○
圧力	○	△	○	△
温度	○	△	○	△

表2 各材質の物性⁴⁾⁵⁾⁶⁾

材 質	軟鋼	ニッケルクロム鋼	PTFE	補強繊維	EPDM
弾性係数 [MPa]	210 000	210 000	400	755-3 138	1-21 (硬度 JIS A 30-90より算出)
引張強度 [MPa]	400	900	31-41	69	5-20

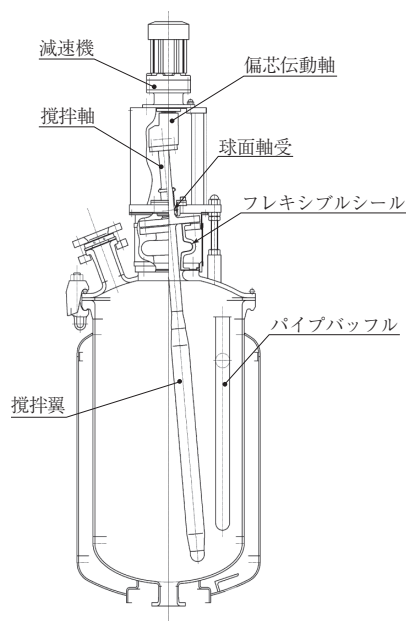


図1 スイングスター反応機

と従来の回転型軸封の性能比較を表1に示す。フレキシブルシールは、これまで困難とされてきた軸封部由来の摩耗、シーラントなどによるコンタミネーションを完全に無くし、さらに従来のメカニカルシールと比べてシール構造もシンプルであるため、洗浄性に優れておりクロスコンタミ防止にも有効である。

スイングスターは、2012年6月に開催されたインターフェックスジャパンに初出展し、販売を開始した。本稿ではこの『スイングスター』について紹介する。

1. スイングスターの形状

1.1 基本構造

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。

攪拌翼は、シンプルな扁平断面形状で洗浄性と攪拌効率を両立し、グラスライニングの施工も可能である。

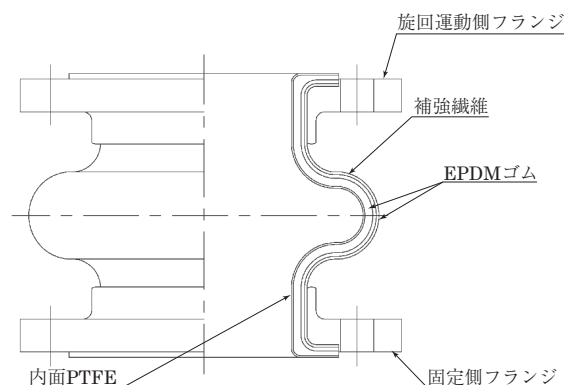


図2 フレキシブルシール

1.2 フレキシブルシール

回転攪拌方式では回転部と静止部とを摺動させて圧力をシールするメカニカルシールが用いられている。スイングスターでは旋回攪拌方式を採用するにあたり、大きな変位を吸収するまったく新しい構造のシール部材の開発に取り組んだ。

シールにはメカニカルシールと同様に耐食性、耐圧性と耐熱性、さらに旋回運動の変位を吸収する可とう性の4つの要素すべてを満たす必要がある。

耐食性を考慮すると接ガス部の材質は、ドライシールと同様に耐食性に優れたPTFEが適している。PTFEで変位を吸収する構造として一般的にはダイヤモンドフラム構造やベローズ構造が挙げられるが、いずれも無摺動攪拌機のシール材として耐圧性が問題となる。

そこで、耐震用または配管の変位吸収用として用いられるエキスパンションジョイントに着目し、スイングスター専用フレキシブルシールの開発を行った。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とし、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。

フレキシブルシールに使用した各材質の物性と、比較のために一般的な鋼板材料である軟鋼、ニッケルクロム鋼の物性を表2に示す。軟鋼やニッケルクロム鋼と比べると、PTFEや補強繊維の剛性(ヤング率)は50分の1以下で非常に柔らかく、引張強度は約8分の1以下であるため、このような材料を用いていか

に耐圧性を確保する構造とするかがポイントとなる。

フレキシブルシールの構造検討には FEM 構造解析を活用した。解析の一例を図 3 に示す。FEM 構造解析では形状、各層の厚み、補強繊維の層数、補強位置を検討、各材質の疲労強度、各層間の密着強度などを考慮して構造を決定し、開発期間の短縮を図ることができた。

また FEM 解析の結果を元にフレキシブルシールを試作し実際に温度、圧力を加えて加速耐久試験を実施し、耐久性を確認した。

2. スイングスターの諸特性

2.1 攪拌動力

2.1.1 攪拌動力理論

通常の回転攪拌による攪拌動力 P [W] は、下記式で表わされる。

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

ここで、

ρ : 液密度 [kg/m³]

n : 回転数 [s⁻¹]

d : 代表径 (翼スパン) [m]

また N_p は、動力数とよばれる無次元数であり、攪拌レイノルズ数、攪拌フルード数および攪拌槽、邪魔板などの幾何学的形状の関数になる。

スイングスターの旋回攪拌方式の場合も以下に示すように回転攪拌と同様に表すことができる。

図 4 に示す旋回攪拌翼について考える。斜線部に発生する抗力 df ³⁾ は、抗力係数を C_D とすると

$$\begin{aligned} df &= C_D \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \cdot (w_1 \cos \theta + w_2 \sin \theta) \cdot dl \\ &= \frac{C_D}{2} \cdot \rho \cdot (1 \cdot \sin \phi \cdot 2\pi n)^2 \cdot (w_1 \cos \theta + w_2 \sin \theta) \cdot dl \\ &= (2\pi)^2 \frac{C_D}{2} \cdot \sin^2 \phi \cdot \rho \cdot n^2 \cdot l^2 \cdot (w_1 \cos \theta + w_2 \sin \theta) \cdot dl \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} dP &= (2\pi)^3 \frac{C_D}{2} \cdot \sin^3 \phi \cdot \rho \cdot n^3 \cdot l^3 \cdot \\ &\quad (w_1 \cos \theta + w_2 \sin \theta) \cdot dl \end{aligned}$$

さらに攪拌翼全体での攪拌動力 P は、

$$\begin{aligned} P &= \int dP \\ &= (2\pi)^3 \frac{C_D}{2} \cdot \sin^3 \phi \cdot \rho \cdot n^3 \cdot (w_1 \cos \theta + w_2 \sin \theta) \\ &\quad \cdot \int_{l_1}^{l_2} l^3 dl \\ &= (2\pi)^3 \frac{C_D}{2} \cdot \sin^3 \phi \cdot \rho \cdot n^3 \cdot (w_1 \cos \theta + w_2 \sin \theta) \\ &\quad \cdot \frac{1}{4} (l_2^4 - l_1^4) \end{aligned}$$

ここで $w_1 = \zeta_1 d$ 、 $w_2 = \zeta_2 d$ 、 $l_1 = \eta_1 d$ 、 $l_2 = \eta_2 d$ とすると

$$P = \left\{ (2\pi)^3 \frac{C_D}{8} \cdot \sin^3 \phi \cdot (\zeta_1 \cos \theta + \zeta_2 \sin \theta) \cdot (\eta_2^4 - \eta_1^4) \right\} \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5$$

となり、通常の回転攪拌と同様に、動力 P は、 ρ 、

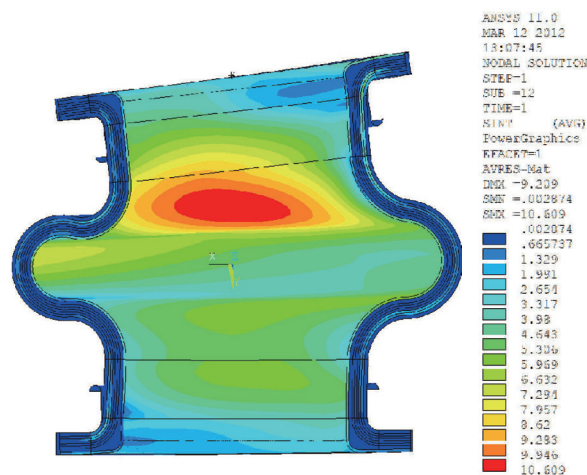


図 3 フレキシブルシール FEM 解析例

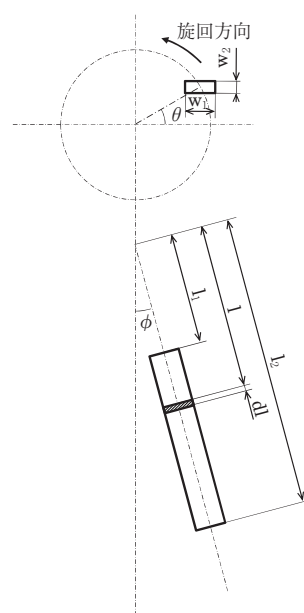


図 4 旋回攪拌の動力

n^3 , d^5 に比例する。以上のように巡回攪拌方式においても回転攪拌と同様に動力数 N_p を

$$N_p = (2\pi)^3 \frac{C_D}{8} \cdot \sin^3 \phi \cdot (\zeta_1 \cos \theta + \zeta_2 \sin \theta) \cdot (\eta_2^4 - \eta_1^4)$$

としてスケールアップが可能である。

2.1.2 攪拌動力測定

槽内径 $D=400$ mm, 2:1 半楕円下鏡形状の円筒槽を用いてスイングスターの攪拌動力を測定した。測定結果を N_p -Re 線図にプロットし図 5 に示す。ここで、スイングスターの攪拌翼代表径 d は、翼巡回最大直径とした。

2.2 混合性能

攪拌性能を評価するため前節と同形状の槽内径 $D=400$ 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用い、混合時間は、脱色過程の連続写真から決定した。

スイングスターの混合性能をオーバル三枚後退翼、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, 2 に示す。実験では液粘度 $0.001, 0.1 Pa \cdot s$, 液深 H は $H/D = 1.25$ の条件にて脱色の速さを比較した。スイングスターは、オーバ

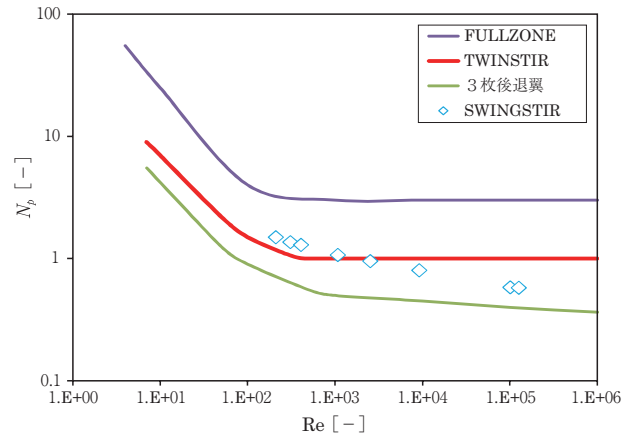


図 5 攪拌動力線図 (N_p -Re 線図)

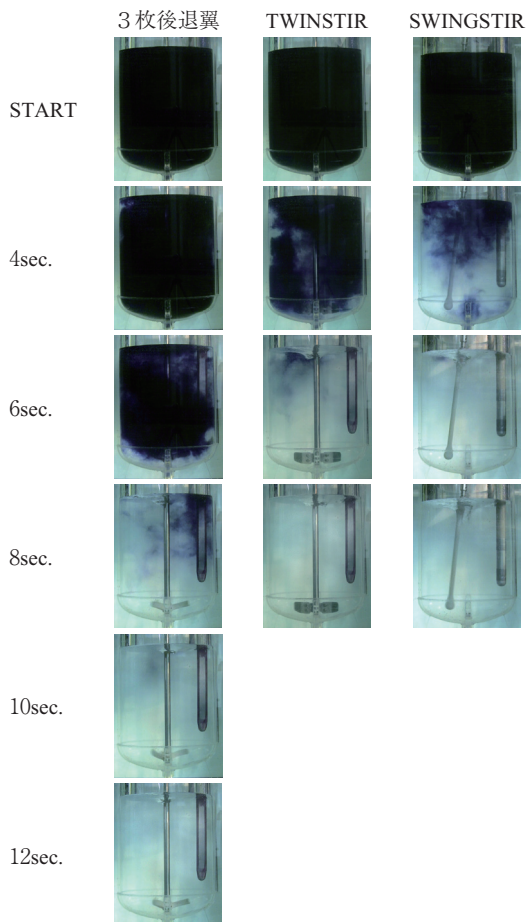


写真 1 混合経過の比較

$\mu = 0.001 Pa \cdot s$ $P_v = 0.05 kW/m^3$ $H/D = 1.25$

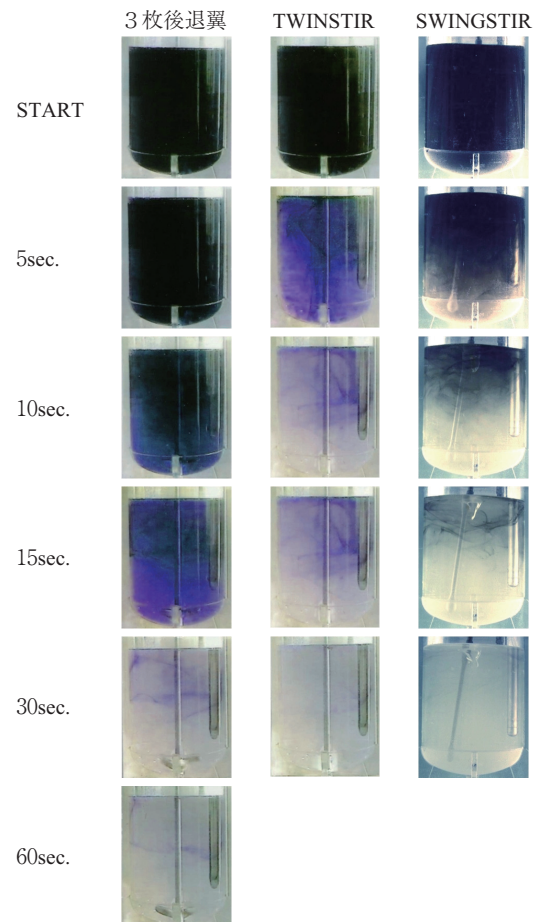


写真 2 混合経過の比較

$\mu = 0.1 Pa \cdot s$ $P_v = 0.05 kW/m^3$ $H/D = 1.25$

ル三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6に示す。シングスターは、ツインスターとオーバル三枚後退翼のほぼ中間的特性を有する。

以上の結果からシングスターは、従来のオーバル三枚後退翼やツインスターとほぼ同等の混合性能を有している。

2.3 流動解析

汎用熱流体解析コード FLUENT14.0 (ANSYS 社) をもちいて解析を行った結果を紹介する。乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ モデルを使用し、混合試験を再現するため以下の手法で解析を実施した。

- ・最初に流れ場を作成し、収束確認後、その時刻を $t = 0$ として
- ・作成した流れ場の液面付近の領域を脱色剤を模擬したトレーサーに置換え、時間間隔を 2.5×10^{-3} 秒として計算を行い、各時刻でのトレーサー濃度を求めた。

シングスターの流動解析によって得られた容器

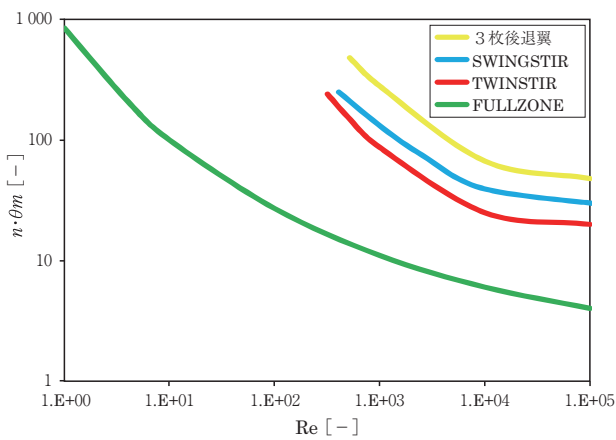


図6 $n \cdot \theta m - Re$ 曲線

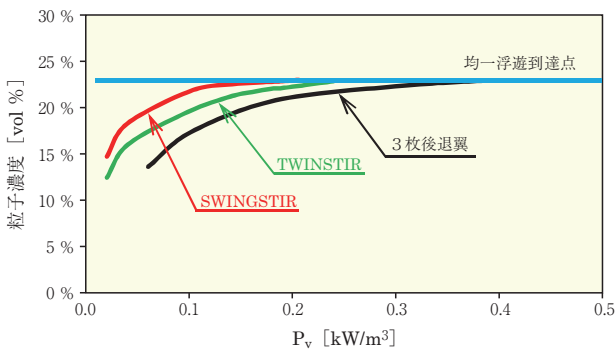


図8 粒子均一浮遊に要する動力の比較

中心とバツフルを含む断面の各時間におけるトレーサー濃度コンターを図7に示す。実際の混合試験結果と比較すると、混合試験における脱色状態と近似している。今後、攪拌条件の検討、翼形状の改善などに流動解析を活用していく予定である。

2.4 異相系攪拌特性

2.4.1 固液系攪拌

固液系攪拌の特性評価のためイオン交換樹脂の懸濁実験を実施した。粒子濃度をかさ体積で23%とし、シングスター、ツインスター、オーバル三枚後退翼それぞれについて回転数を段階的に変化させて粒子の浮遊状態を比較した。液表面近傍で粒子濃度を測定し、単位容積当たりの動力に対してプロットした結果を図8に示す。低動力域ではあるが、シングスターはツインスターの約80%、オーバル三枚後退翼の約50%の動力で粒子の均一浮遊が可能である。

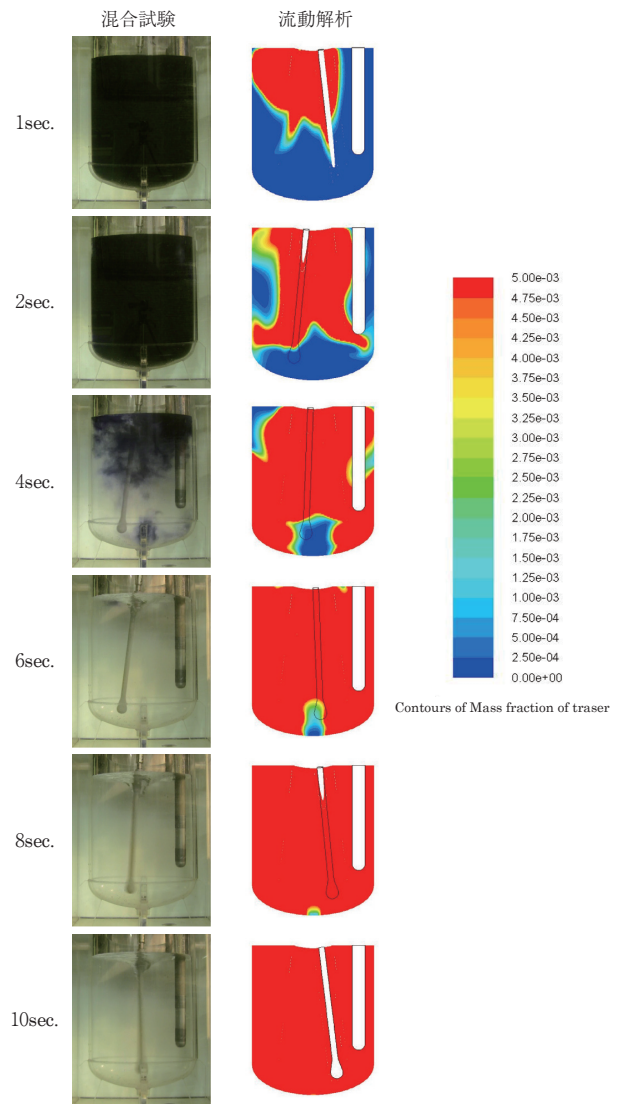


図7 シングスター混合試験と流動解析比較

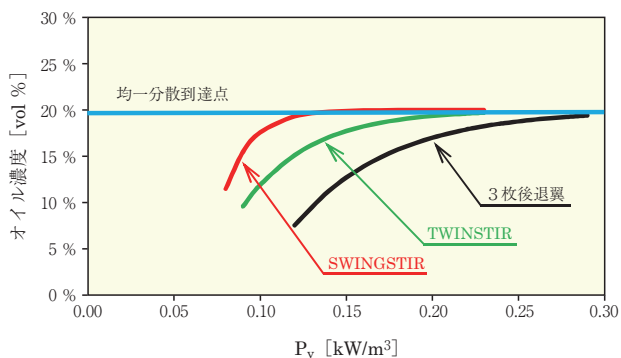


図9 液滴均一分散に要する動力の比較

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 °C
適用法規	消防法
材質	グラスライニング, 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	500	1 000
本体内径 D1 [mm]	500	600	800	1 000
外套内径 D2 [mm]	600	700	900	1 100
全高 H [mm]	1 900	2 100	3 000	3 300
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

2.4.2 液液系攪拌

液液系攪拌の特性評価のため、20 vol%のケロシン（密度790 kg/m³）と水を攪拌槽に満たし、固液攪拌試験と同様にそれぞれ3種類の攪拌翼について回転数を変化させて、液滴の分散状態を観察比較した。攪拌槽、鏡部 T.L. 近傍でケロシン濃度を測定して、単位容積当たりの動力に対してプロットした結果を図9に示す。低動力域ではあるが、スイングスターはツインスターの約70%、オーバル三枚後退翼の約55%の動力で均一分散が可能である。

3. スイングスターの特長と適用分野

【形状】

- ・摺動部のないシール
- ・旋回運動による攪拌
- ・扁平断面のシンプルな攪拌翼

【特長】

- ・フレキシブルシールによりコンタミのリスクがない。
- ・ツインスターと同等の混合性能を有する。
- ・ツインスターの70-80%の動力で粒子の均一浮遊および液滴の分散が可能である。

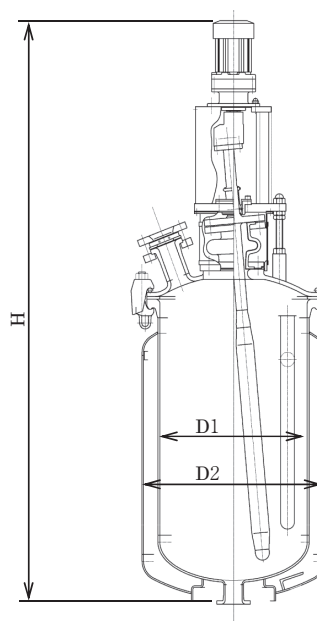


図10 スイングスター反応機の標準寸法

遊および液滴の分散が可能である。

- ・シンプルな形状で、洗浄性が良好である。

【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

本稿では無摺動クリーン攪拌機『スイングスター』について、その開発過程および実験で確認した攪拌性能を紹介した。ここに紹介したスイングスターが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。

今後も製品の開発、改良をとおして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) 菊池雅彦ほか：神鋼パンテック技報 vol.35, No.1 (1991), p.6
- 2) 中村隆彦ほか：神鋼パンテック技報 vol.45, No.1 (2008), p.33
- 3) SHINJI NAGATA：MIXING Principles and applications (1975), p.8
- 4) 中原一郎：実践材料力学 (1994), p.10 養賢堂
- 5) 日本機械学会編：機械工学便覧 B4 材料学・工業材料 (1987), p.130 日本機械学会
- 6) 日本材料学会編：機械材料学 (5版) (1994), p.310, p.313, 日本材料学会

*プロセス機器事業部 技術部 開発室