

培養槽へのスイングスター® 適用検討

Considerations for SWINGSTIR® Application to Culture Vessel



小川智宏*
Tomohiro Ogawa



半田裕利*
Hirotochi Handa



加藤知帆*
Tomoho Kato



山上典之*
Noriyuki Yamagami

スイングスターは独自の旋回攪拌方式を採用した、非回転式のコンタミレス攪拌翼である。スイングスターの低せん断攪拌という特長により麹菌の培養においてタービン翼よりも高収率となる結果が得られている。今回スイングスターのガス吸収性能を測定し、これまで報告されている従来型回転方式の攪拌翼と同様にガス吸収容量係数 k_La は単位液量あたりの攪拌動力 P_v とガス空塔速度 U_g で推算できることを確認した。

The SWINGSTIR is a non-rotating contamination-less impeller that uses an original swing-based mixing system. The yield rate for a culture of *Aspergillus oryzae* was higher than that of a double Rushton turbine impeller because of the SWINGSTIR's featured low shear stress agitation. We measured the gas absorption performance of the SWINGSTIR and confirmed that the overall capacity coefficient of gas absorption of the SWINGSTIR could be estimated from the power consumption per unit mass of liquid for agitation and the superficial gas velocity as has been reported for conventional rotating impellers.

Key Words :

ガ ス 吸 収
 k_La
スケールアップ

Gas absorption
Overall capacity coefficient of gas absorption
Scale-up

【セールスポイント】

- ・非回転式旋回攪拌
- ・低せん断攪拌翼

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コンタミレス攪拌機^{1), 2)}である。またスイングスターは、その低せん断でかつ高い混合性能により、麹菌の培養においてタービン翼よりも高収率となる結果が得られている³⁾。培養については混合性能とガス吸収性能が重要な因子である。スイングスターの混合性能について既報^{1), 2)}にて詳述

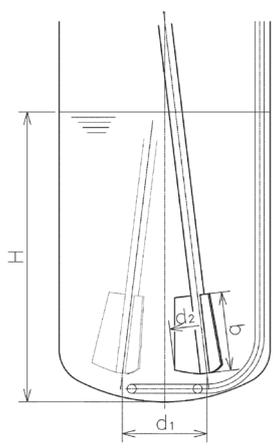
しているが、ガス吸収性能についての研究はこれまで成されていない。

本稿では、スイングスターによる通気攪拌においてガス吸収性能と攪拌条件、通気量、液粘度との関係を実験により把握し、その関係を一般的な相関式にまとめ、スケールアップ時の各因子の変化を表現する試みを加えた。

1. テスト装置およびテスト方法

本テストで使用したテスト装置の概要と各寸法比

表1 スイングスター テスト装置概要

		φ400 テスト装置
形状		
液量	H/D	1.38
旋回径	d1/D	0.4
翼幅	d2/D	0.3
翼高さ	b/D	0.375

を表1に示す。スイングスターは非回転で旋回運動を行う攪拌翼であり、翼スパンに加えて旋回径がパラメータとして加わる。

ガス吸収性能の測定は、次の方法によった。まずテスト液にスパージャーから窒素を通気して液中の酸素を置換した後、攪拌および通気しながら溶存酸素を測定し、次式にて液側物質移動容量係数 $k_L a$ を算出した。

$$k_L a = \frac{\ln(C_i - C_0) - \ln(C_i - C)}{t} \quad (1)$$

ここで、

- C_i : ガス飽和溶解濃度
- C_0 : 初期ガス溶解濃度
- C : 任意の時刻におけるガス溶解濃度
- t : 任意の時刻

である。また溶存酸素の測定には蛍光式溶存酸素計 (WTW 社製溶存酸素計 FDO MULTI3510 型) を用いた。

2. スイングスターのガス吸収特性

2.1 ガス吸収測定結果

スイングスターによって得られた水-空気系の $k_L a$ を、横軸に単位液量当たりの攪拌動力 P_v に対してプロットし、図1に示す。比較のため2段タービン翼に

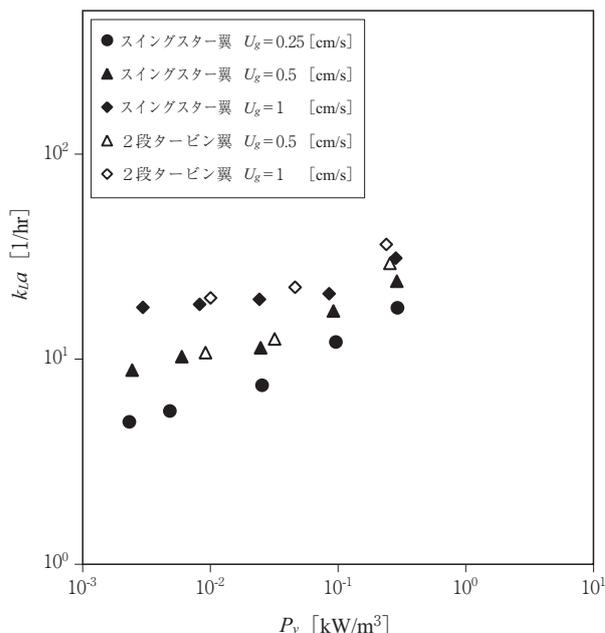


図1 スイングスターおよび2段タービン翼のガス吸収

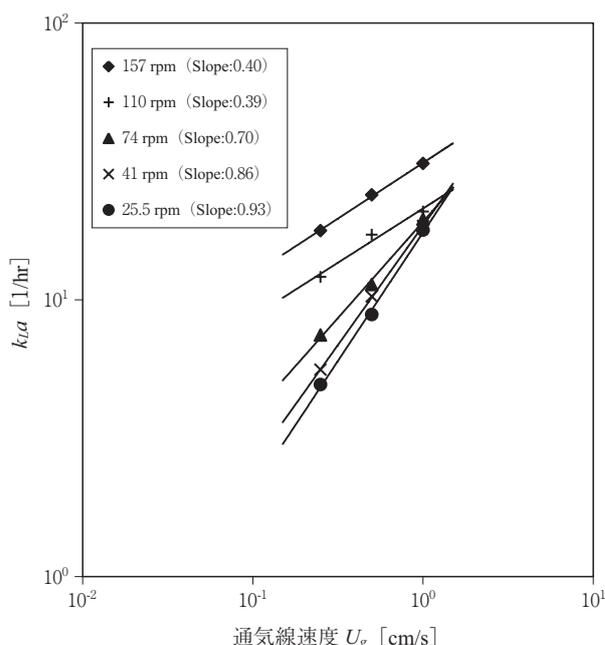


図2 スイングスターにおける U_g と $k_L a$ の関係

よって得られたデータも示す。 $P_v = 0.1 \text{ kW/m}^3$ を超えると2段タービン翼の方がやや高い $k_L a$ をもたす。タービン翼は、高いせん断力で気泡を微細化することにより高 $k_L a$ を実現する攪拌翼であり、高攪拌動力をかける領域では当然の結果と言えるが、 $P_v < 0.1 \text{ kW/m}^3$ の低動力の領域ではスイングスターと2段タービン翼との間に大きな差異は見られない。

図2はスイングスターの各回転数における空塔ガ

ス速度 U_g と $k_L a$ の関係を示したものである。従来の回転式攪拌翼の $k_L a$ は、通気支配状態では U_g の1乗、攪拌支配状態では U_g の1/3乗に比例する。今回のテスト条件は麹菌での培養³⁾で実績のある通気支配と攪拌支配が混在する領域にてデータを収集した。その領域にて $k_L a$ が1乗から1/3乗に徐々に近づいていく傾向は従来の回転式攪拌と同様であった。

2.2 通気支配と攪拌支配

ガス吸収において通気支配と攪拌支配が混在する状態における $k_L a$ は、

$$K_L / P_{av}^{1/3} = A \cdot P_{gv}^\alpha + B \cdot P_{av}^{2/3} \{P_{av} + P_{av}/N_p\} \quad (2)$$

$$P_{av} = U_g \cdot g \quad (3)$$

で表すことができる⁴⁾。ここで、

A, B, α : 翼種を含む装置形状および物性値から得られる係数

P_{av} : 液単位重量当たりの通気動力

P_{gv} : 液単位重量当たりの攪拌動力

である。スイングスターによって得られた結果を、式(2)の形式にしたがってまとめ、図3に示す。

図3から $P_{gv} < 10^2 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^3$ は通気支配領域、 $P_{gv} > 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^3$ は攪拌支配領域として区別することができる。同様の結果は培養でよく用いられるディスク

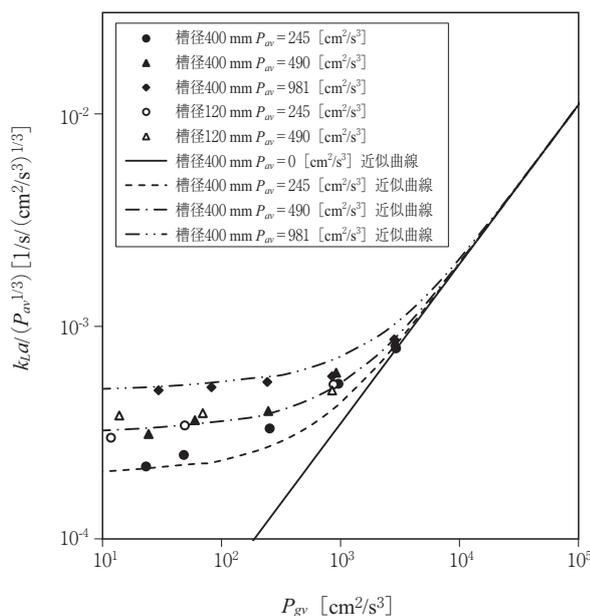


図3 スイングスターの $k_L a$ と通気ガス量の相関

タービン翼でも得られている⁴⁾。また同図に $\phi 120 \text{ mm}$ のテスト機で得られた値をプロットしている。 $P_{gv} < 10^2 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^3$ の通気支配領域で $\phi 120 \text{ mm}$ の方が $\phi 400 \text{ mm}$ よりもやや高い値を示しているのは、通気状況の違いによる影響が考えられるが、 $\phi 120 \text{ mm}$ でも $\phi 400 \text{ mm}$ による結果と同様の相関関係が得られている。

また図中の実線はスイングスターによる結果を式(2)により、攪拌動力の指数項 α をパドル翼と同じ0.75として最小二乗法で近似したラインである。ただしスイングスターの動力数 N_p を直接用いるのではなく、投影径と旋回径の比の2乗を掛けて補正する必要があった。スイングスターの N_p は投影径で定義されているが、この補正により径回転式攪拌機と同じ式で相関でき、実データに近い曲線が得られた。この点の詳細については未だ解明できておらず、今後、さらにデータを増やして明らかにしていきたいと考える。

また $P_{gv} \approx 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^3$ 以上の攪拌の影響が強くなっている領域において、各実測値と近似曲線との間の差が見られる。スパージャーの吹出し孔の位置について、今回テストで使用したスパージャーはタービン翼用に缶内中心部にガス吹出し孔を配置したものである。スイングスターは槽中心部で下降流、槽壁面で上昇流となるフローパターンを形成するため、槽中心部からガスを吹込むと流れが阻害されることが影響している可能性がある。今後、ガス吹出し孔を槽壁面側に設置するなどにより改善を検討していきたい。

いずれにしてもスイングスターのガス吸収容量係数 $k_L a$ は、タービン翼のような従来の攪拌翼と同様に、単位液量あたりの動力 P_v とガス空塔速度 U_g で推算できることが確認された。よってスイングスターについてもラボスケールの培養で得られる $k_L a$ を用いて実機へスケールアップが可能であり、3節にスケールアップ検討例を紹介する。

2.3 液粘性の影響

培養中に液粘度が上がると、ガス吸収性能が低下する。粘性液でのガス吸収性能を確認した。粘性液としてはニュートン流体である水あめ水溶液を用いた。図4は空塔ガス速度および翼回転数を一定とした場合の液粘度 μ と $k_L a$ の関係を示したものである。液粘度が高くなると気泡まわりの境膜が厚くなるなどの影響で $k_L a$ が大幅に低下し、図4からは、粘度が $0.001 \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$ から $1 \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$ に上昇すると $k_L a$ は約1/50にまで減少している。

表2 スケールアップ時の各因子の変化

容 量		V	L	1.5	100	500	1 000	1 500
槽 内 径	$V_r^{1/3}$	D	mm	120	500	800	1 000	1 200
空 塔 面 積	$V_r^{2/3}$	A	cm ²	113	1 963	5 027	7 854	11 310
液 面 高 さ	$V_r^{1/3}$	H	mm	133	509	995	1 273	1 326
	—	H/D	—	1.11	1.02	1.24	1.27	1.11
ガ ス 通 気 量	—	vvm	—	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	V_r	q	L/min.	0.75	50	250	500	750
空 塔 ガ ス 速 度	$V_r^{1/3}$	U_g	cm/s	0.11	0.42	0.83	1.06	1.11
単 位 液 量 当 た り の 攪 拌 動 力	—	P_v	kW/m ³	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
回 転 数	$V_r^{2/9}$	n	rps	2.5	0.97	0.71	0.61	0.54
			rpm	150	57.9	42.3	36.5	32.3
翼 先 端 速 度	$V_r^{1/9}$		m/s	0.38	0.61	0.71	0.76	0.81

西川ら⁵⁾によると高粘度液の k_La は液粘度 μ 、液拡散係数 D_L 、液表面張力 σ と次のような関係がある。

$$k_La \propto \mu^{-1/3} D_L^{1/2} \sigma^{-0.66} \quad (4)$$

図4から得られる傾きは-0.60で上式の-1/3よりも大きい。液拡散係数 D_L 、液表面張力 σ の増粘による変化を含んでいるからである。いずれにしても内容液が高粘度になると、大幅に k_La が低下することは避けられず、効率的な培養を行うには、なるべく培養液の粘度が上昇しないような条件を見つけ出すことも重要といえる。

3. 実機へのスケールアップ

1.5 L ラボ機から、内容液は低粘度乱流域、装置形状を幾何学的相似、 P_v 値一定で実機100 L、500 L、1 000 L、1 500 Lへスケールアップする場合の各因子の変化をまとめ表2に示す。

ガス移動容量係数 k_La はガス空塔速度 U_g に比例するため、酸素供給の面から考えると U_g 一定でのスケールアップで十分である。しかしながら培養槽では酸素供給だけでなく、呼吸によって発生する二酸化炭素の排出を考慮してvvm一定としてスケールアップする機会が多い。その場合、ガス空塔速度 U_g すなわちガス移動容量係数 k_La は、容量のスケールアップ比率を V_r とすると $V_r^{1/3}$ に比例して増加するので、余裕が生じることになる。ただラボ機にてガス空塔速度 U_g が増加した場合の流動状態や、

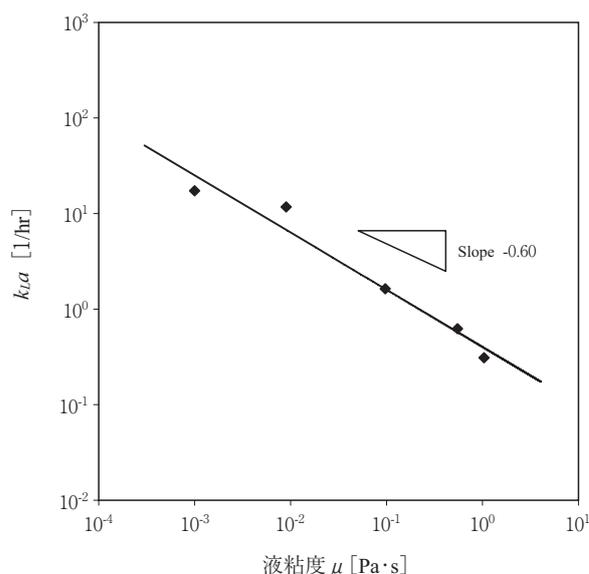


図4 スイングスターにおける液粘度 μ と k_La の関係

$V_r^{1/9}$ に比例して増加する翼先端速度の培養への影響についても確認しておく必要がある。

4. 今後の展望

ガス吸収においてスパージャー形状は重要なファクタであり、2.2節のように吹出し孔位置によって影響がある。また通気支配の領域では吹出し孔径によってもガス吸収性能の改善が可能であり、今後もスイングスターのガス吸収性能について詳細調査、改善検討を行っていきたい。

む す び

本稿では、スイングスターのガス吸収特性を中心にスケールアップ検討について紹介した。これらがユーザ各位の設備検討の参考になれば幸いである。

最後にスイングスターを用いた麹菌の培養に関する研究についてご協力頂いた神戸大学大学院工学研究科、大村直人教授、萩野千秋教授、GHOBADI Nargesさんに、この紙面を借りて深くお礼申し上げます。

[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) 小川智宏ほか：神鋼環境ソリューション技報 vol.11, No.1 (2014), p.43
- 3) N. Ghobadi et al. : 5th Asian Conference on Mixing Proceedings (2016), p45
- 4) Nishikawa, M. et al. : J. Chem. Eng. Jpn., vol.14, No.3 (1981), p219
- 5) 西川正文ほか：化学工学論文集 第9巻, 第1号 (1983), p76
- 6) Nishikawa, M. et al. : J. Chem. Eng. Jpn., vol.14, No.3 (1981), p227
- 7) 今中照雄：神鋼パンテック技報 vol.41, No2 (1998), p.21
- 8) 山部芳ほか：神鋼環境ソリューション技報 vol.11, No.1 (2014), p.49