

流脈観察に基づく非対称大型翼の混合性能評価

加藤禎人^{1*}・伊藤智宏¹・古川陽輝¹・南雲亮¹・多田豊¹・高承台²・李泳世³

¹名古屋工業大学 工学部 生命・物質工学科, 466-8555 名古屋市昭和区御器所町

²韓国東洋大学校 生命化学工学科, 750-711 韓国慶北榮州市豊基邑校村洞1

³韓国慶北大学校 NANO素材工学部化学工学専攻, 742-711 韓国慶北尚州市佳庄洞386

キーワード: 混合, 攪拌, 流脈, 大型翼, 非対称

日本で開発された広い攪拌レイノルズ数で使用可能な各種の大型翼の中に、左右非対称の幾何形状を持つサンメラという翼がある。筆者らは流脈観察に基づきサンメラの混合機構を研究し、その性能が優れているのは流脈が槽内全体を素早く覆い尽くすからであることを明らかにした。また、サンメラは独特の流脈パターンを持ち、液深の変化に対して幅広く対応していることが明らかになった。さらに、サンメラの攪拌所要動力は他の大型翼に対する相関式のごく簡単な修正で相関することが可能であることを示した。

結 言

井上ら(Inoue *et al.* 1999, 2009a, 2009b)および筆者ら(Kato *et al.* **to be published**)の研究から、層流攪拌において流脈の可視化は攪拌翼の混合性能を評価するために非常に有力な手法であることが明らかになった。日本で開発された幅広い粘度範囲や多相系で使用可能な、いわゆる大型パドル翼と呼ばれるマックスブレンド(MB)、フルゾーン(FZ)、スーパーミックス MR205(MR205)は適切な操作条件の下では、流脈が素早く槽内全体を覆い尽くし、非常に優れた攪拌翼であることが示された(Kato *et al.* **to be published**)。

一方、過去の非対称翼の混合時間に関する研究(Kato *et al.*, 2007)で、筆者らは左右非対称の攪拌翼が対称の攪拌翼よりも混合時間が短縮され、より粘度の高い液に対して有効であることを示している。そこで、本研究では大型翼の中で唯一非対称の幾何形状を持つサンメラの混合性能を流脈の可視化を用いて評価することにした。ただし、サンメラ(SM)は三菱重工業(株)が開発した攪拌翼であるが、現在では生産されていない。

本研究によってサンメラはマックスブレンドやフルゾーンよりも液深の変化に対して幅広く対応していることが明らかになったのでここに報告する。

1. 実験装置および方法

本実験に用いた攪拌槽は内径 150mm のアクリル樹脂製平底円筒槽で、主に流脈が明確に可視化できる層流～遷移域 (攪拌レイ

ノルズ数で 10~200) の検討とした。また、攪拌液は種々の粘度 (0.02~0.5Pa・s) に調製した水飴水溶液およびグリセリン水溶液を用い、基本的に液深は槽径と等しくした。攪拌翼の回転数は流脈の観察のしやすさを重視し、経験的に 25rpm を標準とした。翼の幾何形状を Figure 1 に示す。サンメラはカタログを参考にして、アクリル板で自作した。また、ボトムパドルと呼ばれる下部のパドル翼から着色液を染み出させるようにした。大きさは翼径 $d = 90$ mm, 翼幅 $b = 145$ mm とした。着色液には流脈の切断面を観察する場合に蛍光性を持つウラン溶液を、三次元的に全体の流脈を観察する場合にヨウ素溶液を使用した。可視化にはレーザーシート光を利用した。槽の中心の断面を観察するため、スリット光を槽中心に設置した攪拌シャフトに照射するようにした。この

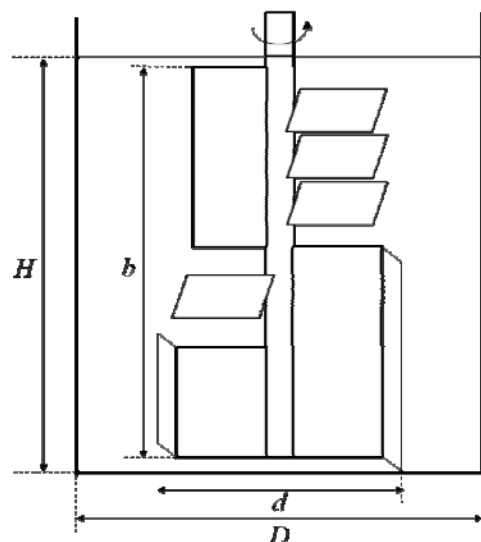


Fig.1 Schematic diagram of “SANMELAER” (SM) impeller

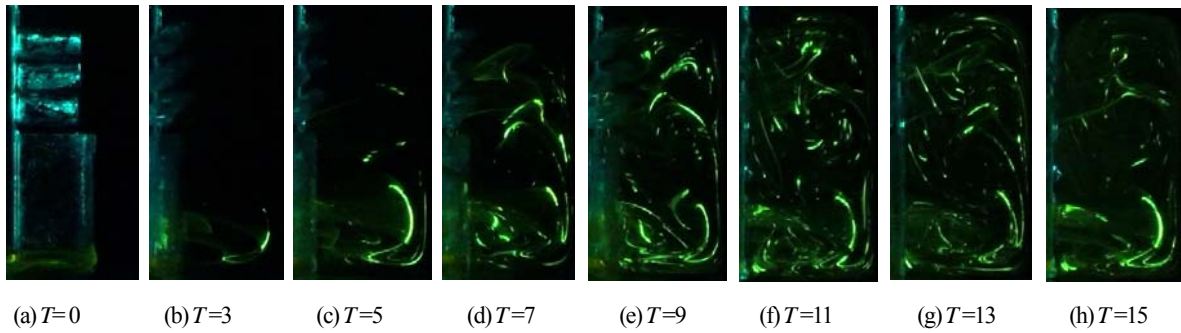


Fig.2 Streak line of SM impeller at $Re=100$

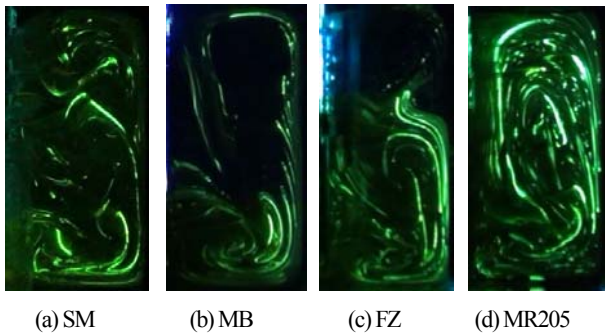


Fig.3 Streak line of several kinds of impellers $Re=100$

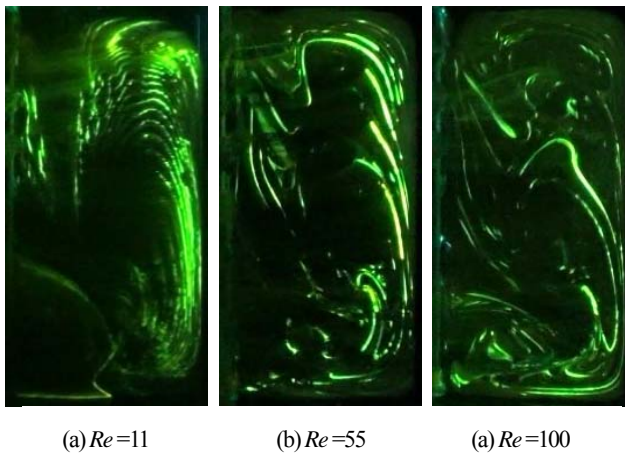
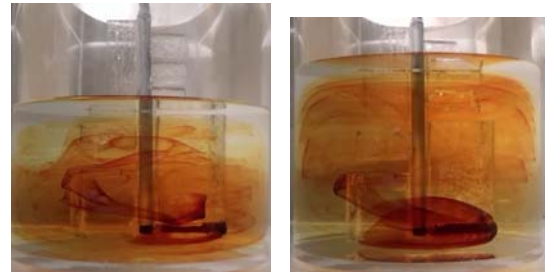


Fig.4 Streak line of SM impeller

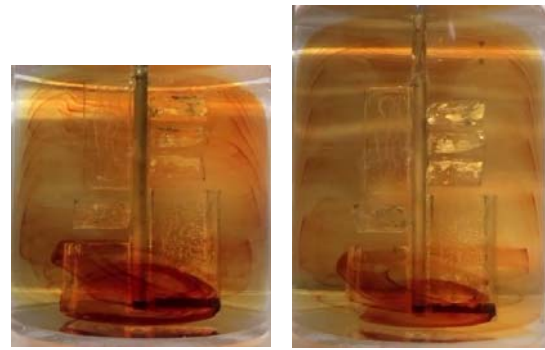
ようにすることで攪拌槽の流脈の垂直断面の半分が可視化できることになる。

攪拌所要動力は、最も一般的な軸トルク測定法を用いた。使用したトルクメーターはSATAKE ST-3000である。動力測定法はこれまでの筆者らの一連の方法(Kato *et al.*, 2010)と同じである。攪拌レイノルズ数が大きな乱流領域では流脈の可視化実験で用いた小さな装置では有効なトルク値が得られなかったため、若干相対スケールアップした槽径が 185mm の攪拌槽を用いた。また邪魔板を使用した場合の条件は、槽径の 1/10 の幅のものを 2 枚、4 枚の場合とした。

2. 実験結果と考察



(a) $H/D=0.55$ (b) $H/D=0.75$



(c) $H/D=1.0$ (d) $H/D=1.3$

Fig.5 Streak line of SM impeller at $Re=49$

2.1 サンメラーと他の大型翼の流脈の相違

Figure 2 に攪拌レイノルズ数 100 におけるサンメラーの流脈の変化を示す。翼の回転周期ごとに流脈の変化を示したが、約 13~15 回転でほぼ流脈が全体に広がっている。また、**Figure 3** に(a)サンメラー、(b)マックスブレンド、(c)フルゾーンそして(d)スーパーマックス MR205 といった他の大型翼も含めた 20 回転後の流脈パターンを示したが、(a)サンメラーは他の翼と異なり、比較的ランダムな流脈パターンが全体に広がっている様子がわかる。また、**Figure 4** に種々の攪拌レイノルズ数における流脈がほぼ変化しなくなったときの流脈を示した。(a) $Re=11$ は 75 回転後、(b) $Re=49$ は 63 回転後、(c) $Re=100$ は 25 回転後のものである。他の大型翼が苦手としていた $Re=11$ においても、図中央部に若干黒い部分が残存しているが、素早く全体に流脈が広がっている様子がわかる。また、他の大型翼とは異なり、槽壁部を直線的に駆け上がるような流脈パターンを取っておらず、あたかも邪魔板を用いた場合の

ような、細かく湾曲した流脈(Inoue *et al.* 2012)となっているのが最大の特徴である。

2.2 液面高さの影響

Figure 5 にサンメラーの種々の液面高さにおける60秒後の流脈の広がりの様子を示す。マックスブレンドおよびフルブーンは翼の上端部と液面の間隔が小さいときや翼上端部が液面から飛び出しているときは槽内が上下に二分されたようなパターンを示していたが(Kato *et al.* to be published), サンメラーにはそのような傾向は現れず、液面高さの変化に極めて良好に対応していた。

2.3 攪拌所要動力特性

次にサンメラーの攪拌所要動力を測定し、幅広いレイノルズ数における動力線図を Figure 6 に示す。その結果、Table 1 に示した他の3種の大型翼とはほぼ同じ動力相関式(Kato *et al.*, 2012)が使用できることがわかった。異なる部分は完全邪魔板条件の動力数 N_{Pmax} を定数項の5.0で固定したこと(サンメラーの複雑な幾何形状で b/d を変化させることはまずありえない)と、遷移域のパラメータ C_{tr} の定数項を実験値に合うように1000から3000に修正(Furukawa *et al.*, 2013)したのみである。サンメラーの完全邪魔板条件における動力数は他の大型翼よりも小さいが、これは傾斜パドル翼が組み合わされているためだと考えられる。

Table 1 Power correlation of “SANMELAER” (SM) impeller

Unbaffled condition

$$N_{P0} = \{[1.2\pi^2\beta^2]/[8d^3/(D^2H)]\}f$$

$$f = C_L/Re_G + C_t\{(C_{tr}/Re_G) + Re_G\}^{-1} + (f_{\infty}/C_t)^{1/m}\}^m$$

$$Re_d = nd^2\rho/\mu, \quad Re_G = \{[\pi\eta\ln(D/d)]/(4d/\beta D)\}Re_d$$

$$C_L = 0.215\eta_p(d/H)[1-(d/D)^2] + 1.83(b/H)(n_p/2)^{1/3}$$

$$C_t = [(1.1X^{2.5})^{-7.8} + (0.25)^{-7.8}]^{-1/7.8}$$

$$m = [(0.71X^{0.373})^{-7.8} + (0.333)^{-7.8}]^{-1/7.8}$$

$$C_{tr} = 3000(d/D)^{-3.24}(b/D)^{-1.18}X^{0.74}$$

$$f_{\infty} = 0.0151(d/D)C_t^{0.308}$$

$$X = \eta_p^{0.7}b/H$$

$$\beta = 2\ln(D/d)/[(D/d)-(d/D)]$$

$$\eta = [\eta\ln(D/d)/(\beta D/d)^5]^{1/3}$$

$$\eta = 0.711\{0.157 + [n_p\ln(D/d)]^{0.611}\}/\{n_p^{0.52}[1-(d/D)^2]\}$$

Baffled condition

$$N_P = [(1+x^3)^{-1/3}]N_{Pmax}$$

$$x = 3.0(B_w/D)n_B^{0.8}/N_{Pmax}^{0.2} + N_{P0}/N_{Pmax}$$

Fully baffled condition

$$N_{Pmax} = 5.0$$

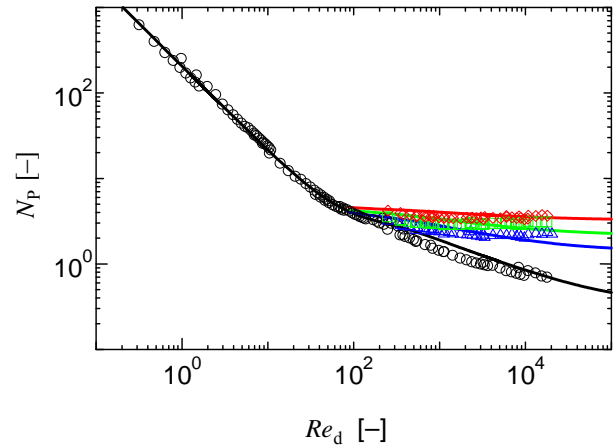


Fig.6 Correlation of power number for SM impeller

○:without baffle, △:one baffle, □:two baffle, ◇:four baffle

結 論

流脈観察により、大型翼の中でも唯一、左右非対称な幾何形状を持つサンメラーは比較的低レイノルズ数まで混合が可能であることがわかった。また、動力特性は他の3種の大型翼に対する共通な動力相関式のマイナーチェンジで使用できることがわかった。

Nomenclature

b	= height of impeller blade	[m]
B_w	= baffle width	[m]
D	= vessel diameter	[m]
d	= impeller diameter	[m]
H	= liquid depth	[m]
N_p	= power number ($=P/\rho n^3 d^5$)	[-]
N_{P0}	= power number at non-baffled condition	[-]
N_{Pmax}	= power number at fully baffled condition	[-]
n	= impeller rotational speed	[s ⁻¹]
n_B	= number of baffle plate	[-]
n_p	= number of impeller blade	[-]
P	= power consumption	[W]
Re_d	= impeller Reynolds number ($=nd^2\rho/\mu$)	[-]
T	= impeller period	[-]
μ	= liquid viscosity	[Pa · s]
ρ	= liquid density	[kg · m ⁻³]

Literature Cited

Furukawa, H., Y. Kato, T. Kato and Y. Tada; “Power Correlations and Mixing Patterns of Several Large Paddle Impellers with Dished

- Bottom,” *J. Chem. Eng. Japan*, **46**, 255–261 (2013)
- Inoue, Y. and Y. Hirata; ”Numerical Analysis of Chaotic Mixing in Plane Cellular Flow I – Formation Mechanism of Initial Mixing Pattern and Fine Mixing Pattern,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **25**, 294–302 (1999)
- Inoue, Y., B.Okada and S.Hashimoto; ”Simplified Model of 3D Velocity Field in a Stirred Tank,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **35**, 201–210 (2009a)
- Inoue, Y., D.Takaoka, B.Okada, K.Natami, S.Hashimoto and Y. Hirata; ”Analysis of Fluid Mixing in an Agitated Vessel Based on a Streakline,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **35**, 265–273 (2009b)
- Inoue, Y., Y. Kato, R. Osaka, K. Natami, O. L. Onyanfo, M. Kawamata and S. Hashimoto; ”Enhancement of Fluid Mixing by Deformations of Streak Surface,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **38**, 191–202 (2012)
- Kato, Y., Y. Tada, M. Ban, Y. Nagatsu and K. Yanagimoto; ”Application of Asymmetric Impeller to Mixing at Unsteady Speed within a Single Revolution,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **33**, 16–19 (2007)
- Kato, Y., Y. Tada, K. Urano, A. Nakaoka and Y. Nagatsu; ”Differences of Mixing Power Consumption between Dished Bottom Vessel and Flat Bottom Vessel,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **36**, 25–29 (2010)
- Kato, Y., A. Obata, T. Kato, H. Furukawa and Y. Tada; ”Power Consumption of Two-Blade Wide Paddle Impellers,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **38**, 139–143 (2012)
- Kato, Y., Y. Inoue, M. Hiramatsu and S. Ohtani; ”Mixing Mechanism of Large Paddle Impeller Based on Streak Line Observation,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **to be published**

Mixing Performance of Large Asymmetric Impeller Based on Streak Line Observation

Yoshihito KATO¹⁺⁺, Tomohiro ITO¹, Haruki FURUKAWA¹, Ryo NAGUMO¹,
Yutaka TADA¹, Song-Tae KOH² and Young-Sei LEE³

¹ Department of Life and Materials Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi 466-8555, Japan

² Department of Bio-Chemical Engineering, Dongyang University, 1 Kyochon, Punggi, Yeongju, Kyungbuk, 750-711, Korea

³ School of NANO&Material Engineering, Kyungpook National University, 386 Gajangdong, Sangju, Kyungpook, 742-711, Korea

E-mail address of corresponding author: kato.yoshihito@nitech.ac.jp

Keyword: Mixing, Agitation, Streak Line, Large Paddle Impeller, Asymmetry

The Sanmeler, an impeller with asymmetric geometry developed by a Japanese company, can be used over a wide range Reynolds number from laminar to turbulent flow regions. Visualization of streak lines showed that their pattern spread quickly throughout the mixing vessel regardless of the liquid height, indicating that the Sanmeler had good mixing performance. The power consumption of the Sanmeler was correlated with simple modification of the correlations of other wide-paddle impellers.