

非ニュートン流体に対する槽回転新型アンカー翼の開発

荒井 拓也¹・森川 議博²・朝山 真輔²・古川 陽輝¹・加藤 禎人¹⁺⁺

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

²日本ソセー工業 (株), 457-0068 名古屋市南区南野1-99

キーワード: 混合, 攪拌, 非ニュートン流体, 新型翼, 槽回転型

塑性流体や粘弾性流体などの非ニュートン流体の混合に適した新しいアンカー翼を開発した。この新しい混合システムは、非定常な回転槽と新しいアンカー翼を組み合わせることにより、非ニュートン流体を容易に混合することができた。また、粘弾性流体に対し、偏心板型シャフトを使って混合すると特異的なフローパターンが発生することを見出し、新型アンカー翼のシャフト形状に反映した。

緒 言

高粘度の非ニュートン流体のバッチ式混合操作には、アンカー翼やヘリカルリボン翼等が主に適用されており、これに関する研究は古くから行われている(Metzner and Otto., 1957; Brito-De La Fuente *et al.*, 1997; Savreux *et al.*, 2007; Jahangiri *et al.*, 2008; Prajapati *et al.*, 2009)。また、高粘度流体の混合には、非定常攪拌、非対称翼、偏心攪拌が有効であることが報告されている(Yao *et al.*, 1988; Nomura *et al.*, 1997; Kato *et al.*, 2006, 2007; Nishi *et al.*, 2014; Kato *et al.*, 2015)。しかし、見かけ粘度が高い流体に関する縦型攪拌槽を用いた報告は近年少数しか見当たらない(Youcefi and Youcefi, 2015)。見かけ粘度が大きい流体の一種としてシリコーンゴムが挙げられる。見かけ粘度が大きく弾性が大きいと、流体が翼と共に回ることがあり、混合が非常に困難になるなどの操作上の難点がある。古くからシリコーンゴムを混合する機構として、翼は停止させ、槽を回転させる方式、さらに定期的に回転方向を反転させる機構を取り入れた槽回転型攪拌機が用

いられてきた。その混合機構を適用することで森川ら(Morikawa *et al.*, 2015)は、見かけ粘度が高い流体がなぜ効率良く混合されるかを実験的に見出した。

本報では、既存の混合技術及び槽回転型攪拌機を組み合わせることにより、高粘度の非ニュートン流体の非定常混合により適した新規な攪拌翼の形状を開発したのでここに報告する。さらに、塑性流体と粘弾性流体では流動が大きく異なるのでそれぞれの流体に適した翼形状とした。

1. 実験装置および方法

攪拌槽は内径 170 mm のアクリル樹脂製平底円筒槽で、二枚羽根パドルは翼径 75 mm、翼幅 20 mm の液高さ 170 mm とした。高粘度の非ニュートン流体の模擬液として、塑性流体(1wt% CVP 水溶液)及び粘弾性流体 (6wt% CMC 水溶液)を用いた。その物性をコーンプレートタイプのレオメーター (HAAKE Rheo Stress 600) で測定した結果を Figure 1 に示した。比較対象のニュートン流体の攪拌液として粘度を 10 Pa・s に調整した水飴水溶液を用いた。その際 Metzner-Otto の推算式 (Metzner and Otto., 1957) から模擬液の見かけ粘度が 10 Pa・s になるように回転数を合わせた。翼回転型とし翼の回転数を、水飴水溶液及び 6wt% CMC 水溶液で

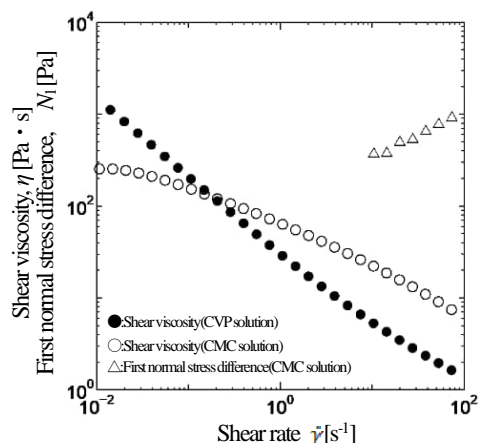
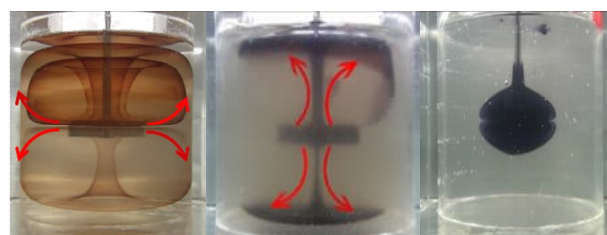


Fig.1 Shear viscosity and first normal stress difference of work fluid



(a) Newtonian fluid (b) Viscoelastic fluid (c) Plastic fluid

Fig.2 Comparison of streak line of paddle impeller at $\mu_{app}=10\text{Pa}\cdot\text{s}$

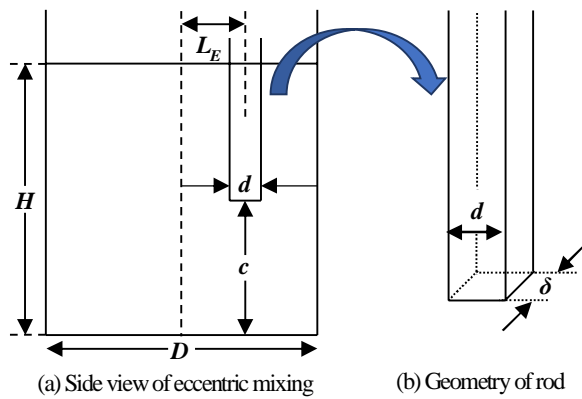


Fig.3 Geometry of experimental apparatus

	Geometry	d [mm]	δ [mm]	L_E [mm]
(a)	Cylinder	8	8	0
(b)	Cylinder	15	15	0
(c)	Plate	20	10	0
(d)	Cylinder	8	8	40
(e)	Cylinder	15	15	40
(f)	Plate	20	10	40

250 rpm, CVP 水溶液で 25 rpm とした。

三次元的に槽内の流脈を観察するためにトレーサーとして着色液にはヨウ素溶液を使用し、翼先端に投入した。Figure 2 に二枚羽根パドルを使用した各溶液のフローパターンを示した。Fig. 2(b)に示されるように粘弾性流体では Fig. 2(a)に示したニュートン流体のように翼先端から液が吐出される流れではなく、逆に翼内側に引き込まれてから槽内を循環する流れを形成し、よく知られたニュートン流体のフローパターンと異なる結果となった。塑性流体は、Fig. 2(c)で示すように翼付近でのみ混合が進む cavem を形成し、翼から離れた位置では全く流動しない結果となった。

粘弾性流体ではシャフトのみの回転により液自由表面が盛り上がるワイゼンベルグ効果が生じることが知られているが、槽内の流動はあまり明らかになっていない。シャフトのみを用いたときの槽内流動に非常に興味深い現象が観察されたため詳細を検討した。その際の実験装置の幾何形状を Figure 3 に示し、Table 1 に種々の条件を示した。

2. 粘弾性流体の特異的な流動

Figure 4 に種々の条件でシャフトのみを用いた着色実験の 300 s 後の特異的な流動の様子を示す。この時使用した攪拌槽は前項

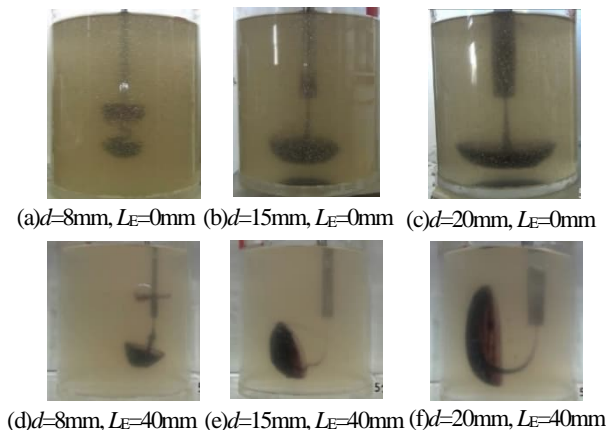


Fig.4 Effect of rod shape on streak line pattern at $n=50$ rpm

と同サイズの槽径 170 mm のアクリル樹脂製平底円筒槽とした。槽を固定しシャフトを回転させ、回転数を 50 rpm とした。シャフト下端と槽底の距離 c を 85 mm とした。Fig. 4(a)–(c)の観察結果から、シャフト幅を広くするほど、鉛直下方向への吐出流が強くなった。板状のシャフト (Fig. 4(c)) を用いることで吐出流がさらに強くなった。Fig. 4(d)–(f)の観察結果から、偏心することにより、またシャフト幅が広がるほど溶液が流動する様子が観察された。Fig. 4(c)と Fig. 4(f)より板状のシャフトを用いることで、槽内をキノコの傘が開いているような 1 ループで循環する流れを形成した。

以上の結果から、粘弾性流体はシャフトの回転のみで、下方吐出する効果があり、また偏心させることにより槽内を循環する流れを生み出すことが明らかになった。このような現象は塑性流体ではまったく観察されなかった。

3. 高粘度流体用アンカー翼の開発

3.1 塑性流体用アンカー翼の開発

3.1.1 混合状態の可視化

塑性流体のモデル液として 4wt% CVP 水溶液を用いた。基本型の攪拌翼は掻き取り効果を持つアンカー翼とした。前項で得

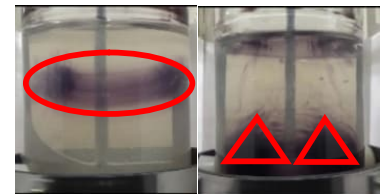


Fig. 5 Isolated mixing region in vessel with anchor impeller

られた結果を応用し、アンカー翼のシャフト部は円柱ではなく長方形の板型とした。槽回転型とし、槽の回転数を 45 rpm, 正転反転のインターバルを 30 s とした。混合過程の可視化は、脱色法にてなされた。Figure 5 に脱色実験の結果を示した。槽中央あるいは槽底付近に未混合領域を形成することが明らかになった。



Fig.6 Photograph of prototype impeller for plastic fluid



Fig.7 Photograph of enlarged view of prototype impeller as shown in Fig.6

3.1.2 新型アンカー翼の最適化

3.1.1 で観察された未混合領域を解消するために、以下に示す (i)～(v) の技術を組み合わせたアンカー翼を塩化ビニル板で作成した。その形状を Figure 6 に示した。

(i) Fig. 5 左の写真で観察される槽中央部の未混合領域を解消するため、ドーナツリングの発生する位置にかぎ状の突起をつけ、左右非対称な翼形状とした。さらに Fig. 4 で観察された結果を基にシャフト形状を板型とした。

(ii) 掻き取り効果をより大きくするため、Figure 7 に示す翼の幅を広くまたエッジを鋭い形状とした。

(iii) Fig. 5 右の写真で観察される槽下部の未混合領域を解消するため、翼幅を広げカーブを描く形状とし、アンカー下部の角部分の面積を広くした。

(iv) 非定常な操作が混合操作に有効であるため、30 秒ごとに正逆反転機構を持つ槽回転型攪拌機を採用した。

(v) 混合後の流体の製品品位をアップさせるため、気泡の混入はできる限り最小限にした。

い、翼が液面から突出していると気泡を巻き込み易くなるため、片方の翼は液面より低くなるよう翼高さを下げることにした。

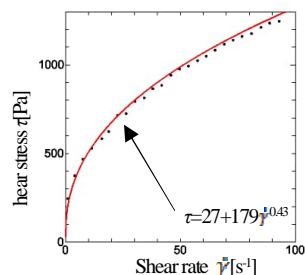


Fig. 8 Rheology of starch glue

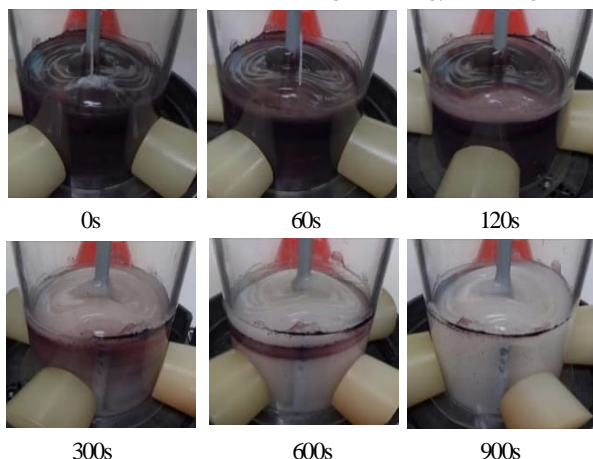


Fig.9 Mixing process of starch glue with prototype impeller in rotating vessel

ここで試作した翼の性能を確認するために混合可視化実験では、CVP 水溶液より降伏値が大きいデンプンのり(ヤマト糊)をモデル液とした。その物性を HAAKE Viscotester VT550 で測定し、Herschel-Bulkleyモデルでフィッティングした結果を Figure 8 に示した。

槽径を 120 mm, 試作翼の翼径を 115 mm, Fig. 6 中、左側のアンカーの翼高さを 85 mm, 右側のアンカーの翼高さを 60 mm とした。また翼下端を槽底にほぼ接触するように設置した。槽回転型を使用し、槽の回転数を 45 rpm, 正転反転のインターバルを 30 s とした。

試作翼の混合過程の可視化および混合時間は、前項同様脱色法で観察・測定した。チオ硫酸ナトリウム水溶液は液自由表面から投入した。脱色法で観察した結果を Figure 9 に示す。定性的な観察ではあるが、約 600 s でほぼバルクの脱色は完了し、槽壁の上部にまだ脱色されていない薄い膜が観察される。これは Fig. 6 の試作翼のかぎ状部の翼高さが低いため、基本型のアンカー翼よりも掻き取り効果が若干弱くなったためと考えられる。しかしながら、通常のアンカー翼ではバルク部の混合に約 900 s を要したことから、たとえ試作翼のかぎ状部の翼高さが低くても、混合性能を維持できたと考えられる。また翼が液面に露出する部分を減らすことができることから気泡の混入を防止できると考えられる。以上の結果から試作翼の混合性能に問題ないと判断し、これを新型翼とした。

3.1.3 新型アンカー翼の実液への検討

次に実液実験として建築現場で使用される降伏値が大きいポリウレタン系シーリング材 (Hamatite SC-PU2 NB)



Fig.10 Photograph of new type impeller for plastic fluid

の混合を試みた。重量比で主剤 (白色) 10 に対して硬化剤 (透明) 1 の割合で 2 液を混合した。混合過程を視覚的に観察するため、また混合時間の測定のために、黒色のトレーサーを液自由表面に添加した。液の全体量は 6 L であり、槽径は 210 mm である。破損を防ぐために本翼は GFRP で製作し、その形状を Figure 10 に示す。新型アンカー翼の翼径は、翼がしなったとき槽壁と接するよう 205 mm とした。Fig. 10 中、左側のアンカーの翼高さを 150 mm, 右側のアンカーの翼高さを 110 mm とした。また翼下端を槽底にほぼ接触するように設置した。槽回転型を使用し、槽の回転数を 45 rpm, 正転反転のインターバルを 30 s とした。

Figure 11 に示すように、定性的な観察ではあるが、約 300 s で

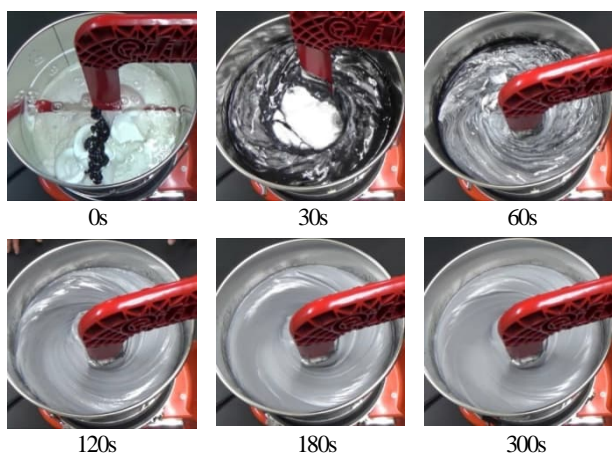


Fig.11 Mixing process of plastic fluid with new impeller in rotating vessel



(a)Normal anchor impeller (b)New impeller
Fig.12 Vertical cross section of hardening polyurethane rubber

ポリウレタン系シーリング材の混合が完了したと判断した。白色の主剤と透明の硬化剤は均質に混合され、1日後には硬化した(混合が十分でない場合は硬化しない)。見かけ粘度が高い流体を、正逆回転機構を持つ槽回転型攪拌機を用いて混合すると、シャフトを中心に設置したとしても、流体から応力を受け、攪拌翼がしなる様子が観察された。この効果により、偏心攪拌の効果が加わり、槽内の流れがより非定常な流れになったため、混合が促進したと考えられる。

Figure 12に硬化後のシーリング材を、缶ごと垂直に切断した断面を示す。(a)に通常のアンカー翼の断面を示し、(b)に新型翼のそれを示し、気泡が観察された箇所を青色で示した。定性的な観察ではあるが、(b)の新型翼の方が気泡の混入が非常に少ない結果であった。シーリング材は品質品位の向上のため気泡の混入防止が求められており、この結果は十分気泡混入の防止ができていていると考えられる。

3.2 粘弾性流体用アンカー翼の開発

3.2.1 混合状態の可視化

粘弾性流体のモデル液として6wt% CMC水溶液を用いた。基本型の攪拌翼は掻き取



Fig.13 Photograph of prototype impeller for viscoelastic fluid

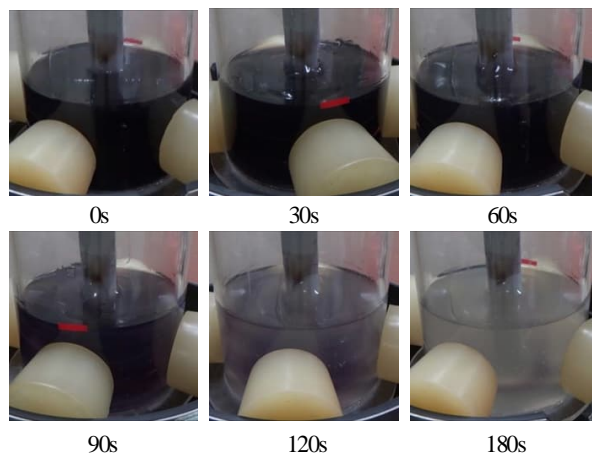


Fig.14 Mixing process of CMC solution with prototype impeller in rotating vessel

り効果を持つアンカー翼とした。粘弾性流体は塑性流体より容易に流動することが前項で明らかになったため、Figure 13に示すように、形状は左右対称のシンプルな翼とした。このような形状にしたのは、(1)Fig.2より、塑性流体よりも粘弾性流体の方が混合操作を加えたとき流動性がある。(2)現場で使用するためには、クリーニングが容易になるよう形状がシンプルな方がよい。(3)溶液の全体量が少ない。という理由からである。またアンカー翼のシャフト部は円柱ではなく長方形の板型とした。槽径を120 mm、試作翼の翼径を115 mm、翼高さを60 mmとした。また翼下端を槽底にほぼ接触するように設置した。槽回転型を使用し、槽の回転数を45 rpm、正転反転のインターバルを30 sとした。

6wt% CMC水溶液の物性はすでにFig. 1に示し、試作翼の混合過程の可視化および混合時間は、脱色法で観察・測定した。チオ硫酸ナトリウムの水溶液は液自由表面から投入した。脱色法で観察した結果をFigure 14に示す。その結果、約180 sで混合が完了した。シャフトを板型にし、槽回転型の攪拌機を適用することで、槽内の流動がより促進したと考えられる。さらに、通常のアンカー翼では約300 sで混合が完了しているのに対し、ここでは約180 sで混合が完了していることから混合性能に問題ないと判断し、これを新型翼とした。

3.2.2 新型アンカー翼の実液への検討

実液実験として建築現場で使用する粘弾性を有するシリコン系シーリング材



Fig.15 Photograph of new type impeller for viscoelastic fluid

(Hamatite SC-MS 2NB)の混合を試みた。重量比で主剤(白色)10に対して硬化剤(透明)1の割合で2液を混合した。混合過程を視覚的に観察するため、また混合時間の測定のために、黒色の

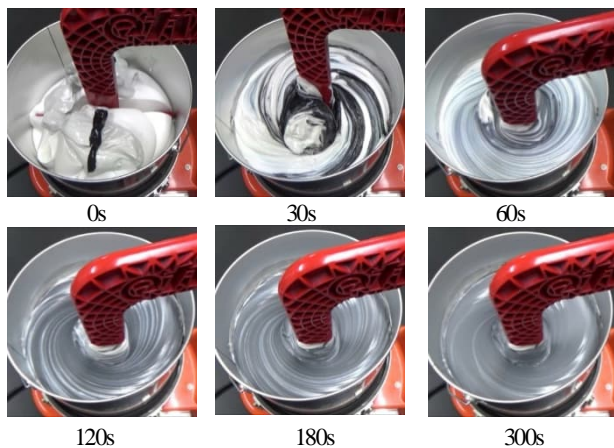


Fig.16 Mixing process of viscoelastic fluid with new impeller in rotating vessel



(a)Normal anchor impeller (b)New impeller

Fig.17 Vertical cross section of hardening silicone rubber

トレーサーを液自由表面に添加した。液の全体量は4 Lであり、槽径は210 mmである。破損を防ぐために本翼はGFRPで作製し、その形状を **Figure 15** に示す。新型アンカー翼の翼径は、偏心したとき槽壁と接するよう 205 mm とした。翼高さを 95 mm とし、翼下端を槽底にほぼ接触するように設置した。槽回転型を使用し、槽の回転数を 45 rpm、正転反転のインターバルを 30 s とした。

Figure 16 に示すように、定性的な観察ではあるが、約 300 s でシリコーン系シーリング材の混合が完了したと判断した。白色の主剤と透明の硬化剤は均質に混合され、1 日後には硬化した(前項同様混合が十分でない場合は硬化しない)。前項同様見かけ粘度が高い流体を、正逆反転機構を持つ槽回転型攪拌機を用いて混合すると、シャフトを中心に設置したとしても、流体から応力を受け、攪拌翼がしなる様子が観察された。この効果により、偏心攪拌の効果が加わり、槽内の流れが非定常な流れになったため、混合が促進したと考えられる。

Figure 17 に硬化後のシーリング材を、缶ごと垂直に切断した断面を示す。(a)に通常のアンカー翼の断面を示し、(b)に新型翼のそれを示した。気泡が観察された箇所を青色で示した。定性的な観察ではあるが、(b)の新型翼の方が気泡の混入が非常に少ない結果であった。前項同様この結果は十分気泡混入の防止ができていると考えられる。

結 論

非ニュートン流体の混合に対し有効な攪拌翼を開発した。粘弾性流体に対しシャフトのみを用いた着色実験により、翼がなくても槽内を循環する流れが生み出されることを見出した。この知見を基に新型翼のシャフトは板型とし、さらに正逆反転機構を持つ槽回転型攪拌機を適用した。塑性流体の混合には、カギ状の突起をつけ、左右非対称な形状にし、アンカー下部の角部分はカーブを描く形状とした。また掻き取り効果をより大きくするため、翼の幅を広くまたエッジを鋭い形状にした。粘弾性流体の混合には、塑性流体より流動しやすいため、左右対称のシンプルな翼とした。さらに塑性流体で有効だったアンカー下部の角部分はカーブを描く形状とし、掻き取り効果をより大きくするため、翼の幅を広く、エッジを鋭い形状にした。

このように多くの技術を組み合わせることで塑性流体および粘弾性流体の混合に適した攪拌翼の幾何形状をそれぞれ開発した。

【謝辞】

実験に際しては、大西明子氏、武山晴美氏の協力を得ました。ここに謝意を表します。

Nomenclature

c	= clearance from rod to bottom	[m]
D	= vessel diameter	[m]
d	= rod diameter	[m]
H	= liquid depth	[m]
L_e	= eccentric length	[m]
n	= impeller rotational speed	[s ⁻¹]
N_1	= first normal stress difference	[Pa]
μ_{app}	= appearance liquid viscosity	[Pa · s]
δ	= impeller thickness	[m]
τ	= shear stress	[Pa]
η	= shear viscosity	[Pa · s]
$\dot{\gamma}$	= shear rate	[s ⁻¹]

Literature Cited

- Brito-De La Fuente, E., L. Choplin, and P. A. Tanguy; "Mixing with helical ribbon impellers: effect of highly shear thinning behaviour and impeller geometry," *Chem. Eng. Research and Design*, **75**, 45-52 (1997)
- Jahangiri, M.; "Shear rates in mixing of viscoelastic fluids by helical ribbon impeller," *Iranian Polymer Journal*, **17**, 831-841 (2008)

- Kato, Y., Y. Tada, S. Nakamichi, Y. Nagatsu, S. Iwata, S. Iwaishi, S. Kajihara, Y. A. Lee and S. T. Koh; “Evaluation of Unsteady Mixing Performance Using a Servo Motor,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **32**, 465-470 (2006)
- Kato, Y., Y. Tada, M. Ban, Y. Nagatsu, and K. Yanagimoto; “Application of Asymmetric Impellers to Mixing at Unsteady Speed within a Single Revolution,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **33**, 16-19 (2007)
- Kato, Y., T. Ito, H. Furukawa, R. Nagumo, Y. Tada, S. T. Koh and Y. S. Lee; “Mixing Performance of Large Asymmetric Impeller Based on Streak line Observation,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **41**, 21-24 (2015)
- Metzner, A. B. and R. E. Otto; “Agitation of Non-Newtonian Fluids,” *AIChE J.*, **3**, 3-10 (1957)
- Monikawa, N., S. Asayama, Y. Kato, Y. Ohinata, N. Kato, S. Iwata, H. Furukawa and R. Nagumo; “Mixing of Viscoelastic Fluid with Anchor Impeller in Rotating Vessel,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **41**, 273-275 (2015)
- Nishi, K., N. Enya, R. Misumi and M. Kaminoyama; “Power Consumption and Mixing Performance of an Eccentrically Located Maxblend Impeller,” *J. Chem. Eng. Japan*, **47**, 146-150 (2014)
- Nomura, T., T. Uchida and K. Takahashi; “Enhancement of Mixing by Unsteady Agitation of an Impeller in an Agitated Vessel,” *J. Chem. Eng. Japan*, **30**, 875-879 (1997)
- Prajapati, P., and F. E. Mozaffari; “CFD Investigation of the Mixing of Yield - Pseudoplastic Fluids with Anchor Impellers,” *Chem. Eng and tech*, **32**, 1211-1218 (2009)
- Savreux, F., P. Jay, and A. Magnin; “Viscoplastic Fluid Mixing in a Rotating Tank,” *Chem. Eng. Sci.*, **62**, 2290-2301 (2007)
- Youcefi, S. and A. Youcefi; “Power Consumption and Mixing Time in Rheologically Complex Fluids by a Two-bladed Impeller,” *J. Mech. Sci. Tech.*, **29**, 543-548 (2015)
- Yao, W.G., H. Sato, K. Takahashi and K. Koyama; “Mixing performance experiments in impeller stirred tanks subjected to unsteady rotational speeds,” *Chem. Eng. Sci.*, **53**, 3031-3041 (1988)

Development of New Anchor Impellers for Non-Newtonian Fluid in a Rotating Vessel

Takuya ARAI¹, Norihiro MORIKAWA², Shinsuke ASAYAMA²,
Haruki FURUKAWA¹ and Yoshihito KATO¹⁺⁺

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

² Nippon Sosey Kogyo Co., Ltd., 1-99 Minamino, Minami-ku, Nagoya-shi, Aichi 457-0068, Japan

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

Keyword : Mixing, Agitation, Non-Newtonian Fluid, New Type Impeller, Rotating Vessel

New anchor impellers were developed for mixing non-Newtonian fluids such as plastic fluid and viscoelastic fluid. This new mixing system combining an unsteady rotating vessel with a new anchor impeller could easily mix a non-Newtonian fluid. A unique flow pattern was found on mixing viscoelastic fluid using an eccentric plate type shaft, and this plate-type shaft was applied to the new anchor impeller.