

急回転するじゃま板付き円筒容器内において 二相成層を成す液体の挙動

杉本 達則*・井口 学*²

Behavior of Stratified Two Liquid Layers Contained in a Baffled Vessel Suddenly Set in Rotation

Tatsunori SUGIMOTO and Manabu IGUCHI

Synopsis : A cylindrical baffled vessel containing two liquids of different densities was rotated suddenly around its vertical axis. The interfacial area between the two liquids increased significantly through the effect of the baffle in the initial stage of rotation and the two liquids returned nearly to the initial state in the final stage of rotation. This phenomenon is very beneficial for promoting mixing of molten steel and slag and later separation of them. The maximum penetration depth of the upper liquid into the lower layer and the flow establishment time of the flow in the vessel were measured. Empirical equations were proposed for these quantities.

Key words : steelmaking; refining; rotation; stratified liquid layers; flow establishment time.

1. 緒言

円筒状の容器を静止状態から急回転させる攪拌方式では、攪拌の過渡期において上層と下層の液体が激しく混合し、攪拌による流動状況が定常に至ると急速に二相が分離される¹⁾。この特性を利用すれば、鉄鋼精錬分野においても回転円筒容器を用いた新たな攪拌方式の確立が期待される。

従来、急回転する円筒容器内における単一層の系については、流動が定常状態に至るまでの過渡期間の流れや過渡時間に関して、川島ら²⁾を始めとして多くの研究がなされている³⁻⁷⁾。しかしながら、二相成層の系における過渡時間に関する研究は少なく不明な点が多い。著者ら¹⁾は前報において二相成層の系に関して層流、遷移流の範囲における過渡時間の予測式を提案したが、同時に円筒容器内にじゃま板を設置することにより、さらなる液-液界面積の増大と攪拌効率の向上が見られることを見出した⁸⁾。そこで本研究では、じゃま板が液-液界面形状および過渡時間に与える影響についてより詳細に調査を行い、実験式を提案した。

2. 実験装置と測定方法

実験装置の概要をFig. 1に示す。アクリル製じゃま板付き円筒容器内に食塩水とシリコンオイルを高さ1:1の割合で充填した。光の屈折による撮影画面の歪みを軽減させるために、水を満たしたアクリル製正方形断面の浴中に、

円筒容器を鉛直に設置し、静止状態から一定角速度 ω で回転させた。円筒容器の回転速度はモーターを介し、リモートコントローラーにより制御した。液-液界面の形状を水平方向からビデオカメラ(30 frames/s)により撮影した。

円筒容器は浴深 $H=120$ mmとし、内径 $D=25, 46, 74$ mmの3種類を使用した。このときアスペクト比 H/D は、1.62~4.80となる。じゃま板の幅 w_b は5, 10, 20 mmの3種類を使用し、厚さは $t_b=3$ mmと固定した。本研究で使用した

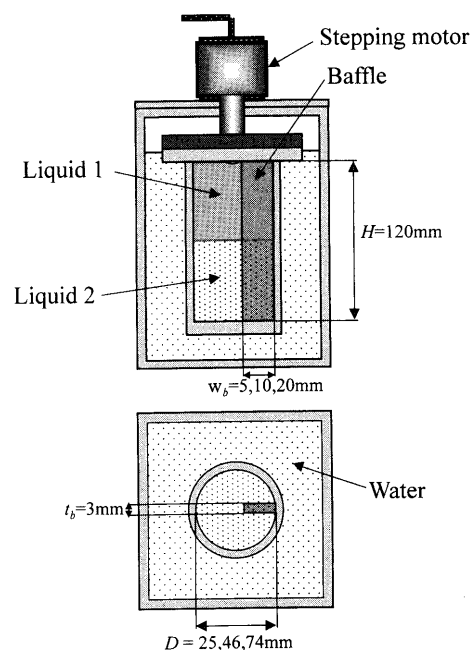


Fig. 1. Schematic of a baffled cylinder.

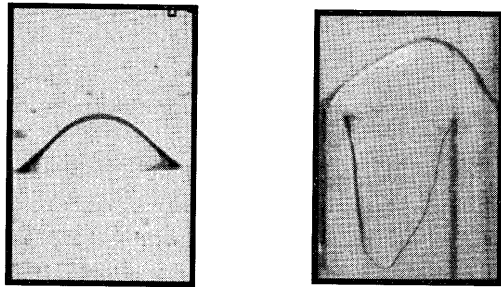
平成15年10月1日受付 平成15年12月22日受理 (Received on Oct. 1, 2003; Accepted on Dec. 22, 2003)

* 北海道大学大学院生 (現:三菱重工業(株)) (Graduate Student, Hokkaido University, now Mitsubishi Heavy Industries Ltd.)

* 2 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

Table 1. Physical properties of liquids.

Liquid	Kinematic viscosity (mm ² /s)	Density (kg/m ³)
Salt Water	1.0	1030
Silicone oil 10	10	935
Silicone oil 50	50	960
Silicone oil 100	100	965



(a) without baffled plate (b) with baffled plate ($w_b=5\text{mm}$)

Fig. 2. Photographs of liquid-liquid interface. ($\omega=11.0$ rad/s, Silicone oil 100-Salt water, $D=46\text{mm}$).

液体の物性値を Table 1 に示す。なお液体名の後部につく数値は動粘度と対応している。回転角速度 ω は、 $7.86\sim 19.64$ rad/s の範囲で行った。レイノルズ数 Re 、エックマン数 Ek の定義は次式で与えられる。

$$Re_1 = R(\omega/v_1)^{0.5} \dots \dots \dots (1)$$

$$Re_2 = R(\omega/v_2)^{0.5} \dots \dots \dots (2)$$

$$Ek_1 = v_1/(\omega H^2) \dots \dots \dots (3)$$

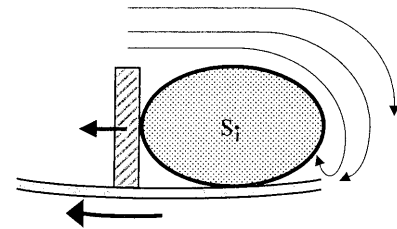
$$Ek_2 = v_2/(\omega H^2) \dots \dots \dots (4)$$

ここで R は円筒容器の半径を表している。本実験条件下において Re_1 および Re_2 は $4.96\sim 146.67$ 、 Ek_1 および Ek_2 は $2.95 \times 10^{-5} \sim 1.26 \times 10^{-3}$ の範囲となった。

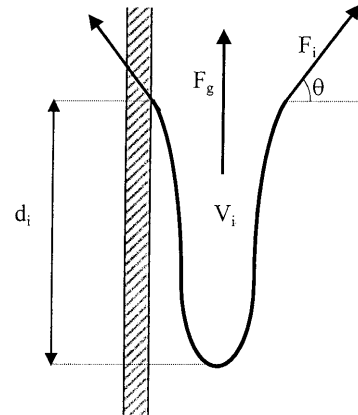
3. 結果と考察

3.1 液-液界面形状に与えるじゃま板の影響

Fig. 2 においてじゃま板を設置した場合と設置しない場合について、界面が最も大きく変形したときの比較を行った。じゃま板を設置した場合、回転攪拌の初期において界面が大きく降下した。じゃま板の急激な動きにより、じゃま板の後方において圧力が低下する。上層の液体であるシリコンオイルは下層の食塩水より動粘度が大きいいため、じゃま板の背後に回り込みやすくなる。その結果、はく離領域は下層の方が上層よりも大きくなって圧力降下は大きくなる。このように、下層の方の圧力降下が大きくなることで界面降下の原因として考えられる。



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 3. Schematic of liquid-liquid interface.

3.2 界面降下距離の実験式の導出

降下した液-液界面の形状を Fig. 3 に模式的に示す。じゃま板の後方において上下方向の圧力差 ΔP が生じたとき、浮力 F_g と界面張力による力 F_i との間に次の関係が成立する。

$$\Delta P S_i = F_g + F_i \sin \theta \dots \dots \dots (5)$$

ここで S_i はじゃま板の後方において圧力が低下した領域の面積を表す。浮力 F_g および界面張力による力 F_i は次式で表される。

$$F_g = (\rho_2 - \rho_1) g V_i \dots \dots \dots (6)$$

$$F_i = \sigma l_i \dots \dots \dots (7)$$

ここで V_i は初期位置から降下した上層の液体の体積、 σ は界面張力、 l_i はじゃま板の後方において圧力が低下した領域の周りの長さを表す。

二液間の圧力差 ΔP は、上下層の液体 1, 2 に対する圧力係数 k_1, k_2 を用いて次式で表せると仮定した。

$$\Delta P = (k_2/2) \rho_2 \{ \omega(R - w_b/2) \}^2 - (k_1/2) \rho_1 \{ \omega(R - w_b/2) \}^2 \dots \dots \dots (8)$$

式(6)~(8)を式(5)に代入すると次式を得る。

$$K \{ \omega(R - w_b/2) \}^2 / g = V_i / S_i + \sigma l_i \sin \theta / \{ (\rho_1 - \rho_2) g \} / S_i \dots \dots \dots (9)$$

$$K = \{ (k_2/2) \rho_2 - (k_1/2) \rho_1 \} / (\rho_1 - \rho_2) \dots \dots \dots (10)$$

ここで V_i, S_i および l_i を直接測定することは困難である。

降下した部分の形状が、深さ d_i 、初期界面位置での直径

が w_b の回転放物体で表されるならば、次の関係が得られる。

$$\sin\theta = 4d_i / (16d_i^2 + w_b^2)^{0.5} \dots\dots\dots(11)$$

$$V_i = \pi w_b^2 d_i / 8 \dots\dots\dots(12)$$

$$S_i = \pi w_b^2 / 4 \dots\dots\dots(13)$$

$$l_i = \pi w_b \dots\dots\dots(14)$$

これらを式(9)に代入すると

$$2K\{\omega(R-w_b/2)\}^2/g = d_i + 8\sigma\sin\theta\{(\rho_2 - \rho_1)gw_b\} \dots\dots\dots(15)$$

が得られる。

降下した液-液界面の形状は Fig. 3 に示すように、全体としては回転放物体に近いが、二層の初期界面近傍では回転放物体からかなりずれている。そこで降下した上層液体の形状が回転放物体からずれている程度を考慮するため、補正係数 m を導入し、式(15)を次式で表した。

$$2K\{\omega(R-w_b/2)\}^2/g = d_i + m\sigma\sin\theta\{(\rho_2 - \rho_1)gw_b\} \dots\dots\dots(16)$$

ここで式(16)の右辺を L_i と表示し

$$L_i = d_i + m\sigma\sin\theta\{(\rho_1 - \rho_2)gw_b\} \dots\dots\dots(17)$$

さらに次のフルード数を導入する。

$$Fr = \{\omega(R-w_b/2)\}^2/(gL_{i,max}) \dots\dots\dots(18)$$

$$L_{i,max} = H/2 + m\sigma\sin\theta\{(\rho_1 - \rho_2)gw_b\} \dots\dots\dots(19)$$

式(16)~(19)を用いると次式が得られる。

$$L_i/L_{i,max} = 2KFr \dots\dots\dots(20)$$

式(20)の両辺には m が含まれているので、試行錯誤法で m を決定する。すなわち、3種類の w_b に対して得られた d_i の測定値を用いて、縦軸に $L_i/L_{i,max}$ 、横軸に Fr をとってプロットしたとき、どの m の値のときに測定値が最もよく整理できるのかを調べた。その結果、Fig. 4 に示すように $m=2.5$ のときが最適であることが分かった。Fig. 4 中の測定値をできるだけよく近似できる線を引けば、その線上の値を読みとることによって降下距離 d_i を予測することができる。 $L_i/L_{i,max}$ が比較的小さい範囲においては実線で示したように直線状の分布をとるが、 $L_i/L_{i,max}$ が大きくなるほど直線と比べ小さな値を示し、 $L_i/L_{i,max}=1$ に漸近していった。以下、 $m=2.5$ として議論を進める。

Fig. 5 に、上層液体の動粘度の違いによる $L_i/L_{i,max}$ の比較を行った。上層の動粘度が大きくなるほど降下距離 d_i 、したがってまた L_i は大きくなった。これは上層の動粘度が大きくなるほど二液間の圧力差が大きくなるためである。容器底面および流れの影響を受けない場合、Fig. 4 に示すように、フルード数 Fr と $L_i/L_{i,max}$ は比例関係にあり、次式で表すことができる。

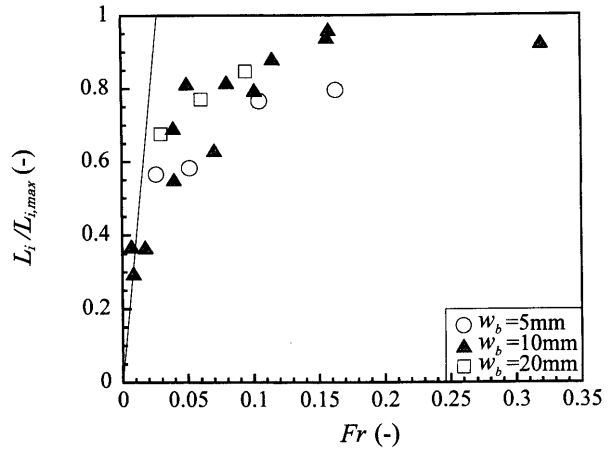


Fig. 4. Relation between Fr and $L_i/L_{i,max}$ (Silicone oil 100-Salt water, $m=2.5$).

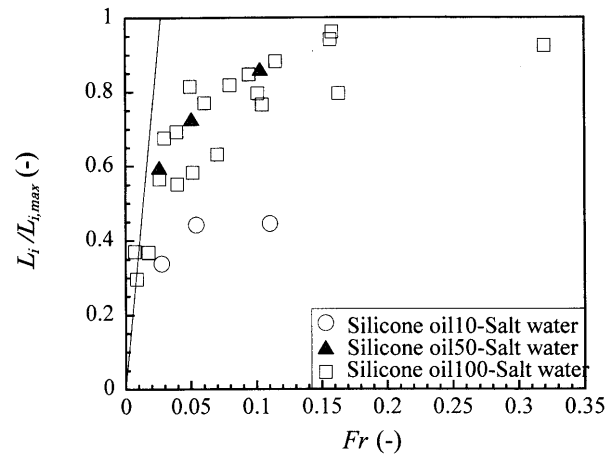


Fig. 5. Relation between Fr and $L_i/L_{i,max}$.

$$L_i/L_{i,max} = nFr \dots\dots\dots(21)$$

ここで $m=2.5$ としたことを明確にするために、式(21)の係数は $2K$ ではなく n で表示している。容器底面および流れの影響が小さいと考えられる条件において、シリコンオイルの種類を変えて係数 n を求めたところ、次式が得られた。

$$n = 6.66\{\rho_2 - (v_1/v_2)^{-0.13}\rho_1\}/(\rho_2 - \rho_1) \dots\dots\dots(22)$$

Fig. 6 に $L_i/L_{i,max}$ と nFr 関係を示した。 $L_i/L_{i,max}$ が大きな範囲においては前述したように、容器底面および両層の流れの影響により直線の分布からずれて 1 へ漸近していく。そこで $L_i/L_{i,max}$ と nFr の関係を求めたところ、次式が得られた。

$$L_i/L_{i,max} = \tanh\{0.72(nFr)^{0.5}\} \dots\dots\dots(23)$$

Fig. 7 において式(23)による計算値と測定値の比較を行った結果、式(23)は $\pm 35\%$ の偏差で適用可能なことが分かった。

3.3 過渡時間に与えるじゃま板の影響

じゃま板を設置しない円筒容器における過渡時間の予測

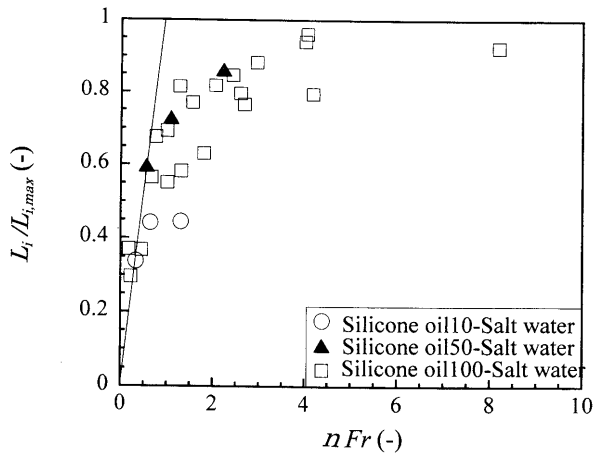


Fig. 6. Relation between nFr and $L_i/L_{i,max}$.

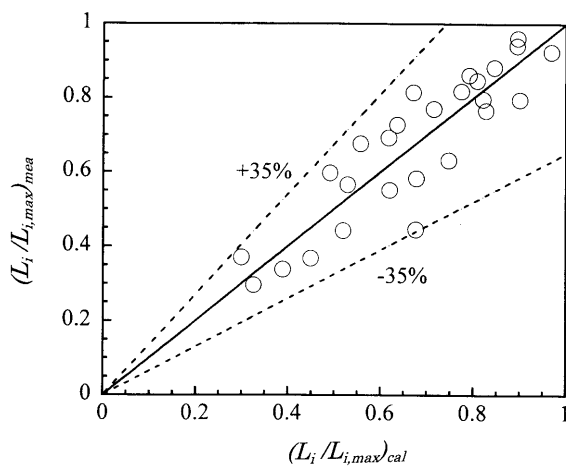


Fig. 7. Relation between $(L_i/L_{i,max})_{mea}$ and $(L_i/L_{i,max})_{cal}$.

式は次式で与えられる⁸⁾。

$$T_s \omega = 0.175 Re_{mix}^{0.5} Ek_{mix}^{-0.5} \dots\dots\dots(24)$$

$$Re_{mix} = R(\omega/v_{mix})^{0.5} \dots\dots\dots(25)$$

$$Ek_{mix} = v_{mix}/(\omega H^2) \dots\dots\dots(26)$$

$$1/v_{mix} = (V_1/V)/v_1 + (V_2/V)/v_2 \dots\dots\dots(27)$$

ここで V_1, V_2 は上層と下層の液体の体積, V は液体の全体積 ($=V_1+V_2$), v_1, v_2 は上層と下層の動粘度を表す。

Fig. 8において式(24)と $D=46\text{ mm}$ の場合の測定値を比較した。じゃま板の幅が $w_b=5\text{ mm}$ においては, 式(24)に近い値をとったが, じゃま板の幅 w_b が大きくなるほど, 式(24)から外れ, 小さな値をとった。Fig. 9に示すように, じゃま板の幅 $w_b=10\text{ mm}$ において, 内径 D が小さくなるほど, 全体の流れに及ぼすじゃま板の影響は大きくなるため, 式(24)から大きくはずれた。また, $T_s \omega$ は $Re_{mix}^{0.5} Ek_{mix}^{-0.5}$ に対して増加傾向を示したが, 幾つかの条件において $Re_{mix}^{0.5} Ek_{mix}^{-0.5}$ が比較的大きい範囲において異なる傾向を示した。この理由をじゃま板のレイノルズ数 Re_b を基に検討した。

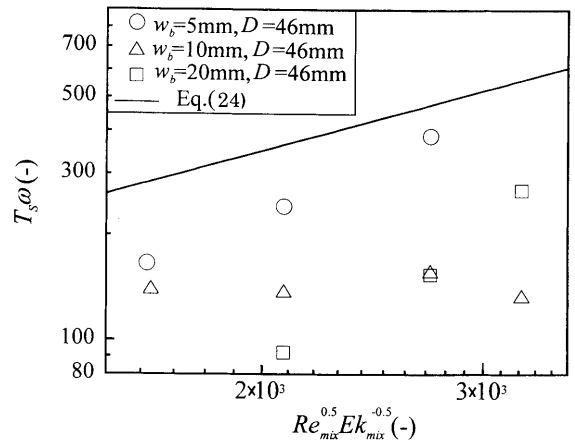


Fig. 8. Comparison of Eq. (24) with measured values. ($D=46\text{ mm}$, Silicone oil 100-Salt water).

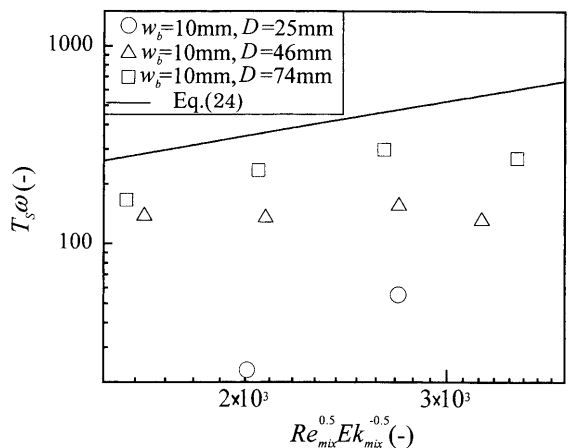


Fig. 9. Comparison of Eq. (24) with measured values ($w_b=10\text{ mm}$, Silicone oil 100-Salt water).

上層と下層の液体中におけるじゃま板のレイノルズ数として Re_{b1}, Re_{b2} を次式で定義した。

$$Re_{b1} = \omega(R-w_b)w_b/v_1 \dots\dots\dots(28)$$

$$Re_{b2} = \omega(R-w_b)w_b/v_2 \dots\dots\dots(29)$$

流れが乱れやすい動粘度の小さな下層におけるじゃま板のレイノルズ数 Re_{b2} と $T_s \omega$ の関係を Fig.10に示す。 $T_s \omega$ は $Re_{b2}=45$ 付近を境界にして異なる傾向を示した。すなわち $Re_{b2}=45$ 付近までの領域において, $T_s \omega$ は Re_{b2} の増加につれて単調に増加するが, 45を超えるとほぼ一定値をとっている。このことから $Re_{b2}=45$ 付近を境界にして, じゃま板の攪拌力が強くなると考えられる。

3.4 じゃま板付き容器における過渡時間の実験式の導出

上述のように, 下層におけるじゃま板のレイノルズ数が $Re_{b2}=45$ より大きい範囲においては, じゃま板による乱れが大きくなるため攪拌力が強くなるが, この範囲では測定値が限られているため, 過渡時間の予測式の導出は Re_{b2} が45以下の場合について行った。

じゃま板が容器内の液体の流動に与える影響が比較的小

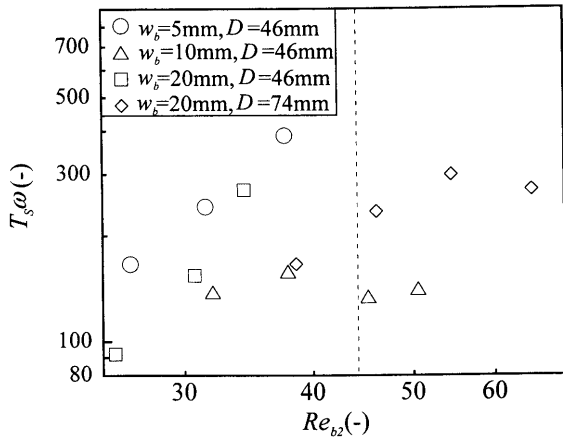


Fig. 10. Relation between Re_{b2} and $T_s\omega$ (Silicone oil 100-Salt water).

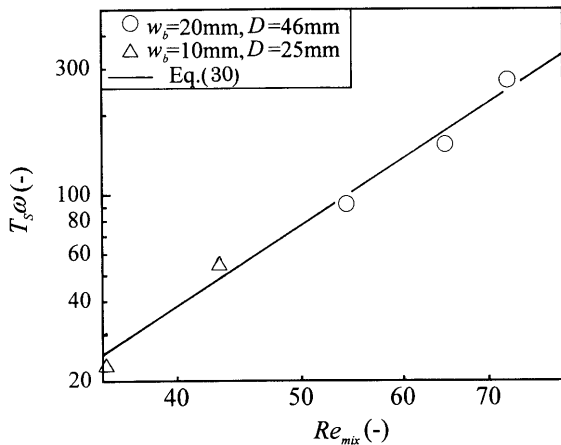


Fig. 11. Relation between Re_{mix} and $T_s\omega$ (Silicone oil 100-Salt water).

さいと考えられる条件($w_b=5\text{ mm}$, $D=46\text{ mm}$)においては、前掲の Fig. 8 にみられるように、 $T_s\omega$ は式 (24) に近い値を示した。一方、じゃま板の影響が比較的大さいと考えられる条件($w_b=20\text{ mm}$, $D=46\text{ mm}$, $w_b=10\text{ mm}$, $D=25\text{ mm}$)における Re_{mix} と $T_s\omega$ の関係を Fig. 11 に示す。測定値は Ek_{mix} に依存せず、次式で近似できる。

$$T_s\omega = 2.8 \times 10^{-4} Re_{mix}^{3.2} \dots\dots\dots (30)$$

これは容器内径 D に対するじゃま板の幅 w_b の割合が大きいため、液体の流動に対する容器上面と底面の影響が非常に小さくなったためと考えられる。このことからじゃま板の幅 w_b が容器内径 D に対して非常に小さい場合、式 (24) に近い値をとり、 w_b が大きくなるにつれて容器上面、底面の影響が小さくなり、式 (30) に近づいていくと考えられる。そこで $T_s\omega$ は指数 β を用いて次式で表せると仮定した。

$$T_s\omega = (0.175 Re_{mix}^{0.5} Ek_{mix}^{-0.5})^\beta (2.8 \times 10^{-4} Re_{mix}^{3.2})^{1-\beta} \dots\dots\dots (31)$$

指数 β は、容器内径 $D (=2R)$ とじゃま板の幅 w_b の関数であり、測定値との比較を行った結果、次式が得られた。

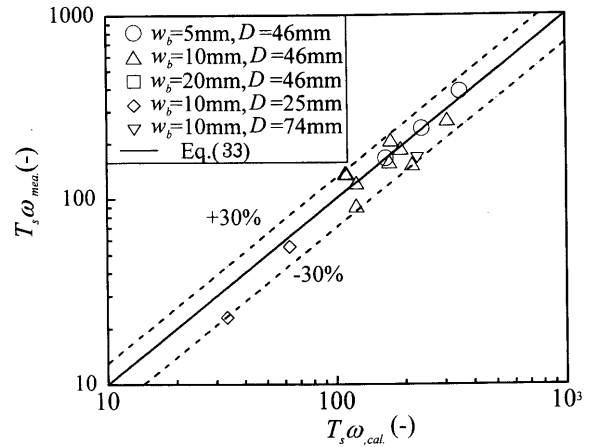


Fig. 12. Comparison of Eq. (33) with measured values for $Re_{b2} < 45$.

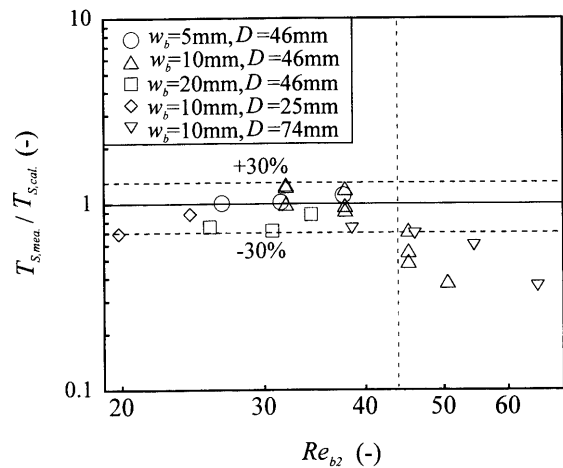


Fig. 13. Relation between Re_{b2} and $T_{S,mea.}/T_{S,cal.}$

$$\beta = \{(R-w_b)/R\}^2 \dots\dots\dots (32)$$

これより $T_s\omega$ は次式で表される。

$$T_s\omega = (0.175 Re_{mix}^{0.5} Ek_{mix}^{-0.5})^{\{(R-w_b)/R\}^2} \times (2.8 \times 10^{-4} Re_{mix}^{3.2})^{1-\{(R-w_b)/R\}^2} \dots\dots\dots (33)$$

式 (33) と $Re_{b2} < 45$ における測定値とを比較して Fig. 12 に示す。 Re_{b2} が 45 より小さい範囲において式 (33) は測定値を $\pm 30\%$ の誤差範囲内で近似することができた。

下層におけるじゃま板のレイノルズ数 Re_{b2} と本実験の測定値を式 (33) で除した値 $T_{S,mea.}/T_{S,cal.}$ との関係を図 13 に示した。 Re_{b2} が 45 より大きい範囲において測定値は式 (33) の予測値を大きく下回ることが分かる。

4. 結論

じゃま板付きの円筒容器に密度の異なる液体を入れて円筒を急回転させたとき、じゃま板の後部において液-液界面が降下する現象が観察された。降下距離に対して導いた

実験式(23)は、測定値を±35%の偏差で近似することができた。

じゃま板を設置することにより過渡時間は大幅に短縮した。じゃま板の幅が大きくなるほど容器上面、底面の影響は小さくなった。じゃま板による乱れの影響が比較的小さい範囲($Re_{b2} < 45$)に対して提案した過渡時間の実験式(33)は測定値を±30%の偏差で近似することができたが、じゃま板による乱れの影響が大きい範囲($Re_{b2} > 45$)においては、過渡時間は実験式よりも小さい値をとった。

記号

D	: 容器径 (mm)
Ek_1, Ek_2	: エックマン数 (-)
H	: 浴深 (mm)
R	: 容器半径 (mm)
Re_1, Re_2	: レイノルズ数
R_V	: 体積比 (-) = V_2/V_1
r	: 半径方向距離 (mm)
T_S	: 過渡時間 (s)
t	: 時間 (s)

V_1	: 上層液体の体積 (mm^3)
V_2	: 下層液体の体積 (mm^3)
ν_1	: 上層液体の動粘度 (mm^2/s)
ν_2	: 下層液体の動粘度 (mm^2/s)
ν_{mix}	: 見掛けの動粘度 (mm^2/s)
ρ_1	: 上層液体の密度 (kg/m^3)
ρ_2	: 下層液体の密度 (kg/m^3)
ω	: 角速度 (rad/s)

文 献

- 1) T.Sugimoto and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **42** (2002), 338.
- 2) M.Kawashima, H.Ogami and W.J.Yang: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **61B** (1995), 2918.
- 3) H.P.Greenspan: *The Theory of Rotating Fluids*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, (1980), 275.
- 4) T.T.Lim, S.Choi and J.M.Hyum: *Trans. ASME J. Fluids Eng.*, **115** (1993), 324.
- 5) K.Imai and T.Yano: *Trans. JSME B*, **63** (1997), 2296.
- 6) S.Yokoya, M.Iguchi, S.Takagi and M.Sakamoto: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 421.
- 7) M.Iguchi, M.Sakamoto, H.Kawabata and S.Yokoya: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 1180.
- 8) T.Sugimoto and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 1867.