コリオリ力を用いた攪拌・混合・洗濯装置の開発*

岩永 正裕^{*1}, 杉山 博隆^{*2}, 野田 祐貴^{*2}
桐生 芳樹^{*2}, 原田 和也^{*2}

Development of Stirring Device and Washing Device Using Coriolis Force

Masahiro IWANAGA^{*1}, Hirotaka SUGIYAMA, Yuki NODA, Yoshiki KIRYU and Kazuya HARADA^{*1}Kanagawa Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
1030 Shimo-ogino, Atsugi, Kanagawa, 243-0292 Japan

Almost stirring devices used blades to stir materials, by the existence of which some efforts were necessary to wash stirring tanks or to exchange materials. So the purpose of this study was to develop devices to stir materials by Coriolis force with no blade. A cylinder rotating around horizontal axis was put on the turntable rotating around vertical axis. The vortex in the rotating cylinder was inclined in the directions upper right or lower right by the effects of Coriolis force. As the speed of turntable was increased, the vortex was collapsed. The phenomena were expected applicable to stirring process and washing process. To examine the effects of stirring process, two types of material were used, that is, undiluted solution of the aqueous paint and washing paste (polyvinyl alcohol). As a result, successful conditions of stirring process became clear with the relations among rotation numbers of capsule, rotation numbers of turntable and diameters of capsule. As an application to cooking, milk shake was cooked at various rotation numbers, and it became clear that it was cooked well when successful conditions were satisfied. As an application to washing, small pieces of the cotton cloth were colored with red ink, and they were washed in a capsule at various rotation numbers, and it became clear that they were washed well, when successful conditions were satisfied.

Key Words: Coriolis Force, Stirring Process, Washing Process, Vortex

1. 緒 言

攪拌・混合装置は一般に攪拌羽根を用いて攪拌しており、攪拌槽の清掃や攪拌材料の入れ替えが不便である。本研究の目的は、攪拌羽根を用いないで、コリオリ力を用いて容器内の流体を攪拌する装置を開発することである。同様の趣旨の先行研究として、木田、後藤らの、歳差運動する球殻内ならびに楕円体内の乱流による拡散に関する詳細な実験的、数値的研究がある⁽¹⁾⁽²⁾。

鉛直軸まわりに回転する回転台の上に水平軸まわりに回転する円筒装置を設置して、円筒装置内に発生させた強制渦が、回転台の回転数を上げていくことによって、どのように変化するかを実験的に調べてきた⁽³⁾。回転台の回転数を上げていくと、円筒内の強制渦は傾きを増し、ついには崩壊する。この渦の崩壊現象を攪拌や洗濯に応用できないかと考えた⁽⁴⁾。

そこで円筒形のカプセル内に白の絵の具と赤の絵の具を満たして、これを攪拌して均一なピンク色にすることができるか、あるいはカプセル内に赤の絵の具を1滴垂らして残りを洗濯ノリ(ポリビニールアルコール)で満たし、この絵の具が均一に攪拌されるかを調べた。

まずカプセルの回転軸を水平から徐々に傾きを増して、攪拌効果がどの角度が最も高いかを調べた。

* 原稿受付 2013 年 4 月 19 日

^{*1} 正員, 神奈川工科大学 (〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野 1030)^{*2} 神奈川工科大学 大学院

E-mail: iwanaga@me.kanagawa-it.ac.jp

次にカプセルの回転数と回転台の回転数を変化させて、どのような場合に攪拌効果があるかを調べた。どのようにして攪拌が行われるかを知るために、射影法⁽⁵⁾によってシミュレーションを行い、流体粒子の軌跡を調べた。

食品加工への応用の一例として、ミルクセーキを作成して、ミルクセーキの出来栄とカプセルの回転数と回転台の回転数の関係を調べた。洗濯行程への応用として、カプセルの中に赤インクで染めた白い木綿布を入れて、洗濯効果とカプセルの回転数と回転台の回転数の関係を調べた。

2. 実験装置

実験装置1と実験装置2の2つの実験装置を制作して使用した。図1に示す実験装置1は、回転場を作る回転台の直径は約450mmで、鉛直軸まわりに回転する。その回転台の上に角度 θ を調節できる台を設置して、その台の上にACモータを設置し、カプセルはこのモータによって回転する。モータにはスリップリングを介して電圧を供給し、外部でスライダックにより電圧を変化させることにより、モータの回転数を制御した。反射テープによる反射光をフォトトランジスタを用いて電気信号に変え、この信号をスリップリングを介して外部で計測して、カプセルの回転数を知ることができる。回転台の回転数は200rpm以下、カプセルの回転数は1300rpm以下で実験を行った。

より回転台の回転数が大きな領域で実験を行うために、図2に示す実験装置2を制作して使用した。実験装置2は直径約220mmの回転台の上で、カプセルを水平軸回りに回転させた。回転台の回転数は700rpm以下、カプセルの回転数は1100rpm以下で実験を行った。カプセルを回転させるプリーに強力な永久磁石を埋め込み、地上に固定したコイルにこの磁石が近づくことにより発生する電流の変化を計測してカプセルの回転数を求めた。

カプセルの角速度を ω 、回転台の角速度を Ω とする。

Fig.1 Schematic diagram of apparatus No.1

Fig.2 Schematic diagram of apparatus No.2

3. 実験結果

3・1 カプセル回転軸の角度の影響

実験装置 1 と内径 52mm, 長さ 140mm のカプセルを用い, カプセル内には白の絵の具を 8 割, 赤の絵の具を 2 割満たした. 赤の絵の具は比重 1.13, 粘度 $4\text{Pa}\cdot\text{s}$, 白の絵の具は比重 1.44, 粘度 $7\text{Pa}\cdot\text{s}$ である. 回転台の上にビデオカメラを設置して, 時々刻々のカプセル内の色の変化を記録した. 実験は暗室の中で行い, 回転台に固定したライトでカプセルを照らしながら撮影を行った. 回転台の回転数は約 150rpm, カプセルの回転数は 800~900rpm になるように制御して実験を行った.

色の判定はビデオ画像をコンピュータに取り込んで, 各点の色を 3 原色 (赤, 緑, 青) に分解して 0~255 の値で記録する. 白色光の元でならば, 赤を 1, 白を 0 とする赤の度合いに変換するには

$$\text{赤の度合い} = \{ \text{赤} / (\text{赤} + \text{緑} + \text{青}) - 1/3 \} \times 3/2$$

で与えられる. 投下光の白色光からのズレを補正するために, 攪拌前の白の部分における赤の度合いと, 赤の部分における赤の度合いを予め求めておいて,

$$(\text{赤の度合い} - \text{白部の赤の度合い}) / (\text{赤部の赤の度合い} - \text{白部の赤の度合い})$$

として, 攪拌過程の各点の赤の度合いを算出した.

図 3 は横軸にカプセルの軸方向位置をカプセルの長さで無次元化した値をとり, 縦軸に赤の度合いをとった. 1 分毎のカプセルの赤の色の度合いの分布の変化を示している. 攪拌前には図 1 に示すように, 赤と白の絵の具のはっきりと分離しているが, 6 分後には図 4 に示すように均一なピンク色に混ざっていることがわかる. このカプセルを冷凍した上で切断して内部を観察した結果, 内部まで均一に攪拌されていることが確かめられた.

図 5~図 8 はカプセルの回転軸の角度 θ を $15^\circ \sim 75^\circ$ に傾けたときの, 図 3 と同様の結果である. いずれの場合も 6 分経っても均一なピンク色にならずにムラがあることがわかる.

Fig.3 Distribution of Red Color($\theta=0^\circ$)

Fig.4 Photo of the Capsule after stirring

Fig.5 Distribution of Red Color($\theta=15^\circ$)

Fig.6 Distribution of Red Color($\theta=30^\circ$)

Fig.7 Distribution of Red Color($\theta=45^\circ$)

Fig.8 Distribution of Red Color($\theta=75^\circ$)

図9は縦軸に攪拌途中のカプセル中の色の均一度をとり、横軸に経過時間をとった。縦軸の値は標準偏差 σ を

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\text{赤の度合い} - \text{赤の度合いの平均値})^2}{N}}$$

均一度 = σ / 赤の度合いの平均値

として算出した。値が小さいほど均一である。カプセルの回転軸の傾きが 45° 以上の場合、これ以上攪拌を続けても均一化は望めそうにない。 30° 以下の角度では、攪拌を続ければより均一化される様相を呈しているが、角度 0° の攪拌能力が顕著である。

Fig.9 Influence of inclination of axis of capsule

3・2 攪拌条件

図10は縦軸にカプセルの回転数を取り、横軸に回転台の回転数をとった。カプセルの回転軸は水平である。○印は攪拌が成功した実験点、×印は攪拌が不完全な実験点を示す。実験装置1(図1)を用いて実験を行い、内径52mm、長さ140mmのカプセルを用いた。赤印は3.1と同様に、カプセル内の8割を白の絵の具、2割を赤の絵の具で満たした場合であり、青印はカプセルの中に $4\text{Pa} \cdot \text{s}$ の赤の絵の具を一滴たらし、残りを粘度が $0.9\text{Pa} \cdot \text{s}$ の透明な洗濯ノリ(ポリビニールアルコール)で満たした場合である。攪拌の成功、失敗の判定は、6分以上回転させた後に、目視によりカプセル内が均一であるか否かを判定した。赤印、青印で粘度が大きく異なるにもかかわらず、攪拌の成功、失敗の領域はほぼ一致していることがわかる。

図11は図10と同様の図であるが、カプセルの大きさを次の5種類に変化させて調べた。

- ① カプセル内径：34mm、カプセル長さ：64mm、アスペクト比：1.9 (50ml)
- ② カプセル内径：39mm、カプセル長さ：96.5mm、アスペクト比：2.5 (100ml)
- ③ カプセル内径：45mm、カプセル長さ：128mm、アスペクト比：2.8 (200ml)
- ④ カプセル内径：52mm、カプセル長さ：140mm、アスペクト比：2.7 (300ml)
- ⑤ カプセル内径：63mm、カプセル長さ：165mm、アスペクト比：2.6 (500ml)

実験は実験装置 2 (図 2) で行い、カプセルの中には、 $4\text{Pa}\cdot\text{s}$ の赤の絵の具を一滴たらし、残りを粘度が $0.9\text{Pa}\cdot\text{s}$ の透明な洗濯ノリ (ポリビニールアルコール) で満たした。6 分以上回転させた後に、目視によりカプセル内が均一であるか否かを判定した。図 11 より攪拌を成功させるには次の条件が必要であることがわかった。

- (1) カプセルの大きさによらず、カプセルの回転数が 400rpm 以上であること。
- (2) カプセルの大きさ毎に回転台の回転数の下限が存在して、その値はカプセルが小さくなるほど大きくなる。
- (3) カプセルの大きさ毎に原点を通る直線が存在して、その直線よりも下方の領域であること。この直線の傾き ω/Ω は、慣性力とコリオリ力の比を表すロスビー数を表す。すなわち、カプセル毎に上限のロスビー数が存在し、この値はカプセルが小さくなるほど小さくなる。

以上を表にまとめたものが、表 1 である。カプセルの大きさが大きいほど、攪拌成功の領域は広いことがわかる。

カプセル内径を横軸にとってグラフ表示したものが、図 12～図 14 であり、上記 (1) ～ (3) の条件を表している。それぞれ縦軸にカプセルの回転数の下限値、回転台の回転数の下限値、 ω/Ω をとった。

Fig.10 Successful conditions of stirring process for two types of test material with different viscosities

Fig.11 Successful conditions of stirring process for several types of capsules with different diameters

Table1 Successful Conditions of stirring process

Inner capacity	500ml	300ml	200ml	100ml	50ml
Diameter	63mm	52mm	45mm	39mm	34mm
ω/Ω	8.28 and less	5.6 and less	4.28 and less	3.8 and less	3.46 and less
Number of rotations of turntable	90 rpm and over	140 rpm and over	150 rpm and over	180 rpm and over	200 rpm and over
Number of rotations of capsule	400rpm and over				
viscosity	From 0.9Pa·s to 6Pa·s

Fig.12 Lower limit of rotation number of capsule

Fig.13 Lower limit of rotation number of turntable

Fig.14 Upper limit of value of ω/Ω

3・3 シミュレーション

図 15 は射影法⁽⁵⁾を用いて、 $\omega/\Omega=3.3$ 、カプセルの半径を代表長さとし、カプセルの外周速を代表速度としたレイノルズ数が 100 の場合のカプセル内部の流体の動きを調べたもので、速度分布と流体粒子の軌跡を 3 方向から見た図である。白い領域はカプセルの軸方向速度が負の領域、灰色の領域は正の領域で、○印は渦中心位置を示す。流体粒子の軌跡は暗い点から明るい点に向かって流体粒子が移動することを示しており、カプセル中のかなり広い範囲を流体粒子が動き回ることがわかる。このような過程で攪拌が行われると考えられる。

図 16 は実験装置 1 を用いて、内径 52mm、長さ 140mm のカプセルに $4\text{Pa}\cdot\text{s}$ の赤の絵の具を一滴たらし、残りを粘度が $0.9\text{Pa}\cdot\text{s}$ の透明な洗濯ノリ（ポリビニールアルコール）で満たして、その内部の時間的な変化をビデオ撮影したときの一瞬の画像である。シミュレーション結果と類似した渦芯のうねりが観察された。

3・4 食品加工への応用（ミルクセーキ）

食品加工への応用の手始めとして、ミルクセーキを作ることを試みた。直径 65mm、長さ 165mm、容量 500ml のカプセルを水平軸周りに回転させる。回転台の回転数は 70～200rpm、カプセルの回転数は 300～900rpm である。カプセルにミルクセーキの材料となる牛乳 300ml、卵の黄身 2 個、砂糖 36 g を入れ、残りは空気ですみ込み 5 分間回転させる。よく攪拌されたミルクセーキは美味しく、ネットリとした食感で粘度が高いことから、粘度計測によりその完成度を判定することにした。攪拌後に残った卵の黄身等を排除した試料と、牛乳をそれぞれ 22°C に温度調整して、細管法に基づく粘度計で粘度を計測した。

図 17 中の各印はミルクセーキの粘度と牛乳の粘度の比によって分類されており、この値が大きいほど攪拌効果が大きく、美味しいミルクセーキが作れたことになる。攪拌効果が大きい領域で粘度が高く、その中でも回転数が高いほど攪拌効果が大きいことがわかる。

3・5 洗濯効果

三角巾をカットした $80\text{mm}\times 80\text{mm}$ の木綿布をテストピースとして、万年筆用の赤色インクと水を 1:100 の割合で混ぜた液に浸けた後に乾燥させた。この布枚を水 500ml、洗剤 1g とともに直径 65mm、長さ 165mm、容量 500ml のカプセルに入れて、回転台の回転数 700rpm 以下、カプセルの回転数 700rpm 以下で 1 分間回転させた。時間を 1 分間に限ったのは、洗濯効果が強力で、これ以上攪拌を続けると、回転条件による色の変化が見られなくなるためである。この布を 1 日乾燥させた後に、スキャナーで画像として取り込み、Visual Basic で作成した画像解析プログラムで解析した。各点の色を赤、緑、青に分解して 0～255 の数値として計測し、赤の数値が、緑と青の数値の平均値に対して何倍であるかで、赤色の濃さを表した。この値が 1 のとき赤の残留度は 0 で、この値が大きくなるほど赤の残留度が多いことを表す。

図 18 の各印は赤色の濃さを表す数値により分類されており、この値が 1 に近いほど赤色が薄く洗濯効果が大きいことを表す。攪拌効果が大きい領域で洗濯効果が大きく、その中でも回転数が高いほど洗濯効果が大きいことがわかる。

Fig.15 Flow pattern when aspect ratio is 2.0, ω/Ω is 3.3, Reynolds number is 100

Fig.16 Photo of flow pattern in a capsule

Fig.17 Successful conditions for cooking milk shake

Fig.18 Successful condition for washing

4. 結 言

鉛直軸まわりに回転する回転台の上に、回転する円筒形のカプセルを設置して、カプセル内の流体の攪拌効果について調べて次のような結果を得た。なおカプセルは内径が 34mm～64mm の範囲の数種について実験を行った。

- 1) カプセルの回転軸の角度を水平から $0^\circ \sim 75^\circ$ の範囲で変化させて攪拌効果を調べた。その結果水平（回転台の回転軸と垂直）の場合に、最も攪拌効果が大きいことが確かめられた。
- 2) カプセルの回転数と回転台の回転数を変化させて、均一に攪拌できる条件を調べた。粘度が $6\text{Pa} \cdot \text{s}$ と $0.9\text{Pa} \cdot \text{s}$ の試料について調べ、その結果粘度の大きさによらず、十分な攪拌を得るためには次のような条件が必要であることがわかった。

- a) カプセルの内径によらず、カプセルの回転数が 400rpm 以上であること。
 - b) 回転台の回転数の下限が存在し、その値はカプセルの内径が小さくなるほど大きくなる。
 - c) カプセルの回転数と回転台の回転数の比の値に上限があり、この値はカプセルの内径が小さくなるほど小さくなる。
 - 3) 射影法によってシミュレーションを行い、流体粒子の軌跡を調べ、その軌跡が複雑で攪拌効果をもたらすことを確かめた。
 - 4) 攪拌効果の実例としてミルクセーキを作成して、その出来栄を、粘度を計測することにより調べた結果、2) の攪拌条件領域内で、回転台の回転数が大きいほど、良い出来栄であることがわかった。
 - 5) 洗濯効果の検証として、赤インクで染めた白い木綿布を入れて、洗濯効果を調べた結果、2) の攪拌条件領域内で、回転台の回転数が大きいほど、洗濯効果が高いことがわかった。
- 以上のことより、攪拌羽根を用いなく、コリオリ力を用いて容器内の流体を攪拌する装置を開発することででき、食品加工や、洗濯機として利用できることを確かめた。

謝 辞

本研究の遂行に当たっては神奈川工科大学卒業研究生菊地悠、佐藤洋平、里中俊介、神尾健太、高志岩、岩本健人、小西邦尚、酒井直人、林和人、西原幸太郎、村上慧、中川皓天、関 雄介の諸氏の協力を得た。卒業研究生近藤亜沙美氏は食品加工への応用としてミルクセーキを提案された。ここに記して謝意を表する。

付録 無次元数ならびに実験結果の考察

木田、後藤らは、現象を Ω/ω (歳差強さ) と $\rho \omega a^2 / \mu$ (レイノルズ数) の無次元数で整理している^{(1) (2)}。ここに a は円筒半径である。

改めてどのような無次元数が、攪拌条件に関する本実験結果を説明するのに適しているかを考察する。諸物理量の代表値を以下のように見積もる。 L はカプセルの軸方向の長さである。

代表速度 $= a\omega$, 代表面積 $= aL$, 代表体積 $= a^2L$

代表せん断力 $= (\mu a \omega / a) aL = \mu \omega aL$ (代表せん断応力と代表面積の積)

代表慣性力 $= \rho (a\omega)^2 aL = \rho \omega^2 a^3L$ (代表面積を単位時間に通過する運動量)

代表コリオリ力 $= (\rho a \omega \Omega) a^2L = \rho \omega \Omega a^3L$ (単位体積の流体に加わるコリオリ力の代表値と代表体積の積)

これらを用いて定義される無次元数は以下の3つである。

レイノルズ数: 慣性力と粘性力の比 $Re = \rho \omega^2 a^3L / (\mu \omega aL) = \rho \omega a^2 / \mu$ 。

ロスビー数: 慣性力とコリオリ力の比 $Ro = \rho \omega^2 a^3L / (\rho \omega \Omega a^3L) = \omega / \Omega$ (木田、後藤らの歳差強さの逆数となっている)。

エクマン数: 粘性力とコリオリ力の比 $Ek = \mu \omega aL / (\rho \omega \Omega a^3L) = \mu / (\rho \Omega a^2)$ 。

$Re = Ro / Ek$ の関係がある。図 10 において粘度が大きく異なる 2 つの流体に対して、攪拌条件が一致しているため、粘度を含むレイノルズ数またはエクマン数を用いて実験結果を整理することは難しいと考えられる。

次に遠心力とコリオリ力の比を表す無次元数を考える。

水平軸周りの回転による代表遠心力 $= (\rho a \omega^2) a^2L = \rho \omega^2 a^3L$

鉛直軸周りの回転による代表遠心力 $= (\rho L \Omega^2) a^2L = \rho \Omega^2 a^2L^2$

水平軸周りの回転による遠心力とコリオリ力の比 $= \omega / \Omega$

となり、ロスビー数に一致する。

鉛直軸周りの回転による遠心力とコリオリ力の比 $= (\Omega / \omega) (L / a)$

の値がある値 χ よりも小さくなる必要があるとすると、 $(\Omega / \omega) (L / a) < \chi$ すなわち $\omega / \Omega > (L / a) (1 / \chi)$ となって、ロスビー数の下限が存在することになる。

χ の値を水平軸周りの回転による遠心力とコリオリ力の比 (ロスビー数) の上限値と同じであると考えて、各供試カプセルについてロスビー数の下限値を求めると

- ① (50ml) L/a : 3.8, χ : 3.5, $\omega / \Omega > 1.1$
- ② (100ml) L/a : 5.0, χ : 3.8, $\omega / \Omega > 1.3$
- ③ (200ml) L/a : 5.7, χ : 4.3, $\omega / \Omega > 1.3$
- ④ (300ml) L/a : 5.4, χ : 5.6, $\omega / \Omega > 0.96$
- ⑤ (500ml) L/a : 5.2, χ : 8.3, $\omega / \Omega > 0.63$

となり、 ω に下限があることは説明できても、図 11 の水平軸周りの回転数の下限値がカプセルの大きさによらず 400rpm という実験結果とは一致しない。

図 15 において白い領域はカプセルの軸方向速度が負の領域、灰色の領域は正の領域であり、回転円筒とともに回転する座標から見ると、かなり広い領域で、1 回転する間に z 方向速度が正の値と負の値の間で時間変動することがわかる。

この z 方向速度の変動の大体の大きさを見積もる。座標系は図 15 と同様にとり、流体粒子の運動を単純化して、粒子に働く圧力抗力、摩擦抗力影響を無視して考えてみる。半径 r の円周上を角速度 ω で回転している粒子の座標を $x=r \cos(\omega t)$, $y=r \sin(\omega t)$ とすると、この粒子に z 方向に単位体積当たり働くコリオリ力は $-2\rho r\omega \Omega \cos(\omega t)$ となる。この粒子が自由に動けると仮定して運動方程式を立てると

$\rho d^2z/dt^2 = -2\rho r\omega \Omega \cos(\omega t)$ となり、これを積分して $dz/dt = -2r\Omega \sin(\omega t)$, $z = 2r\Omega \cos(\omega t)/\omega$ を得る。今攪拌・混合を行うためには z 方向の速度の振幅が W_{lim} 以上必要であり、粒子の位置の振幅も B_{lim} 以上必要であると仮定すると、 $2r\Omega > W_{lim}$, $2r\Omega/\omega > B_{lim}$ の不等式が得られる。これより

$$\Omega > W_{lim}/(2r)$$

$$\omega/\Omega < 2r/B_{lim}$$

の 2 式が得られて、それぞれ図 13, 図 14 に対応して、カプセルの直径が大きくなると Ω の下限値が小さくなること、カプセルの直径が大きくなると ω/Ω の上限値が大きくなることを表している。表 1, 図 13, 図 14 を用いて、 $2r$ をカプセル直径として、 W_{lim} と B_{lim} を見積もると、 W_{lim} は約 0.7m/s, B_{lim} は約 0.01m となる。

- ① (50ml) W_{lim} : 0.71m/s, B_{lim} : 0.0098m
- ② (100ml) W_{lim} : 0.74m/s, B_{lim} : 0.010m
- ③ (200ml) W_{lim} : 0.71m/s, B_{lim} : 0.011m
- ④ (300ml) W_{lim} : 0.76m/s, B_{lim} : 0.0093m
- ⑤ (500ml) W_{lim} : 0.59m/s, B_{lim} : 0.0076m

ここでも ω が限りなく小さいとすると、 z 方向速度の振幅と位置の振幅は限界値以上であっても、混合・攪拌効果は望めない。水平軸周りの回転数の下限が 400rpm であることは、 z 方向の振動周波数が約 6.7Hz 以上必要であることを意味していると考えられる。

以上、単純にモデル化した流体粒子について、コリオリ力によってもたらされるカプセル軸方向の振動運動を調べた。混合・攪拌するためには、カプセル軸方向の速度の振幅の下限値 (約 0.7m/s), 位置の振幅の下限値 (約 0.01m), 振動周波数の下限値 (約 6.7Hz) があると仮定すると、表 1, 図 12, 図 13, 図 14 の実験結果をほぼ説明できることがわかった。

文 献

- (1) S.Goto, N.Ishii, S.Kida and M.Nishioka, "Turbulence generator using a precessing sphere", *PHYSICS OF FLUIDS*, Vol. 19, No.6(2007), pp.061705-1 -061705-4.
- (2) 山登将宏, 後藤晋, 堀本康文, 清水雅樹, 河原源太, "歳差運動する球体容器内に維持される界面活性剤水溶液の乱流", 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 (2012/11 京都), pp. 311-312.
- (3) 岩永正裕, 杉山博隆, 野田祐貴, 桐生芳樹, 原田和也, "水槽内の渦に対するコリオリ力の影響", 日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集 (2011), CDROM NO.G050034.
- (4) 岩永正裕, 混合攪拌装置および方法, 日本国特許出願 2012-67809 (2012).
- (5) 数値流体力学編集委員会編, 非圧縮性流体解析, 初版 (1995), pp. 93-94, 東京大学出版会.