

渦流式攪拌器による混合・分離現象

横谷 真一郎*・高木 茂男*・佐々木 清人*²・井口 学*³

Novel Mixing and Separation Method through Vortex Stirrer

Shinichiro YOKOYA, Shigeo TAKAGI, Kiyoto SASAKI and Manabu IGUCHI

Synopsis : There is a strong demand for innovation of steel-making processes, because the preservation of global-environment, energy and resource saving as well as productivity cost and quality on steel are important issues for sustainable-development of steel industry. Without imparting artificial energy, vortex stirrer using only a gravitational energy is invented and studied. Obtained results are as follows: The refining reagent can be completely sucked into the hot metal through the vortex effect. The tangential velocity decreases inversely with increasing radially the distance from the free surface. The calculated results coincide well with the experimental results.

Key words : swirling flow; vortex stirrer; vortex effect; gravitational energy.

1. はじめに

鉄鋼プロセスの高生産性、高品質化に対する要求は益々高いレベルに達しているが、地球環境を守り、持続的発展を達成するために更なるエネルギー、資源の節約が要請されている。従来、精錬プロセスにおいて、溶鋼と濡れない粉体精錬剤を密度差が大きく異なる溶鋼と混合させるには特別なエネルギー（インジェクション法、KR法と言った機械的エネルギー、電磁誘導攪拌といった電気エネルギー

等)の供給が必要であった。したがって、外部からの特別なエネルギー供給を出来るだけ少なくして、省エネルギーに努め、かつ、効率良く混合・分離作用が生じるプロセスの開発が緊急かつ重要な課題である。そこで著者らは濡れ性が悪く、かつ密度差の大きな物質を外部エネルギーなしに混合できる反応器として漏斗型混合容器を提案した。渦流式攪拌装置（サイクロン）に流入してきた溶鋼は位置エネルギーによって一種の渦を形成して、中心部に気柱部が発生する。漏斗下端部の絞り作用で形成された環状噴流が

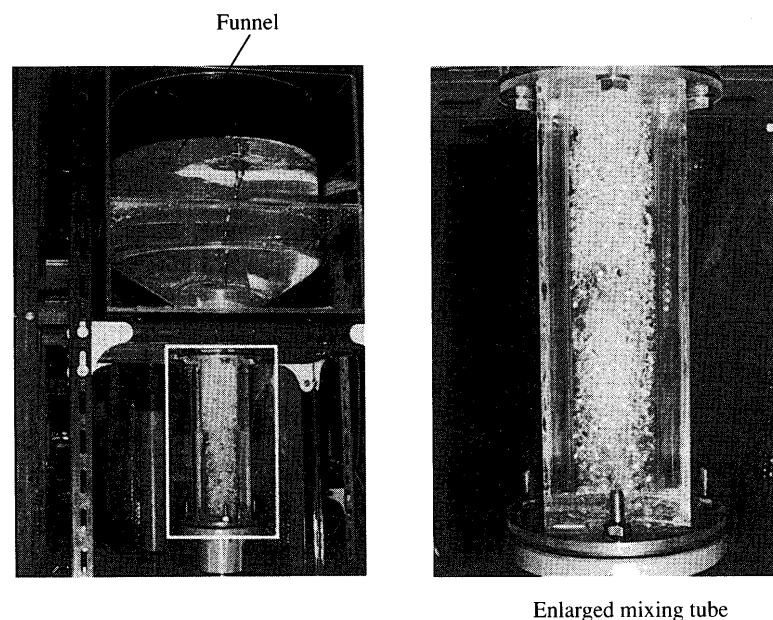


Fig. 1. Vortex stirrer and its mixing for water modeling: tube diameter of 50 mm, flow rate of 22 L/min, mean axial velocity of 0.19 m/s, isolite particle of 1 mm.

平成 15 年 10 月 6 日 受付 平成 15 年 12 月 15 日 受理 (Received on Oct. 6, 2003; Accepted on Dec. 15, 2003)

* 日本工業大学機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Nippon Institute of Technology, 4-1 Gakudai Miyashiro-cho Minami-Saitama-gun Saitama-ken 345-8501)

* 2 東邦テナックス (株) (TOHO TENAX Co., Ltd.)

* 3 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

激しく混合槽の溶銅面に突入することによって、激しく混合槽の溶銅を攪拌する (Fig. 1 参照)。その激しい攪拌作用によって粉体精錬剤をメタル中に均一に分散させ、反応界面積を増大させて、脱珪、脱硫、脱燐、介在物浮上などの熔融金属精錬反応プロセスの高効率化・省エネルギー化を目論むものである。上述の漏斗式攪拌器に関して水モデルの検討をおこなっているが^{1,2)}、最近田中ら^{3,4)}が水銀溶液による実験から漏斗による良好な渦の形成と水銀と濡れないビーズ等を容易に巻き込むことを確かめている。したがって、本研究では渦流式攪拌器による混合・分離現象の機構を明らかにすることを目的として、水モデルによる実験的、数値解析的検討を行った。

2. 実験方法

Fig. 2 に渦流式攪拌器の縦断面図を示す。各座標の原点は漏斗部底面 (漏斗吐出口) の中心とした。攪拌器は3つのセクションに分かれており、自由渦を発生させる漏斗部、気液や低密度粒子などの攪拌を行う混合管部、混合管内の水位を一定に保つための受液槽部からなっている。漏斗内の水位が十分定常状態になったことを確認した後、漏斗内

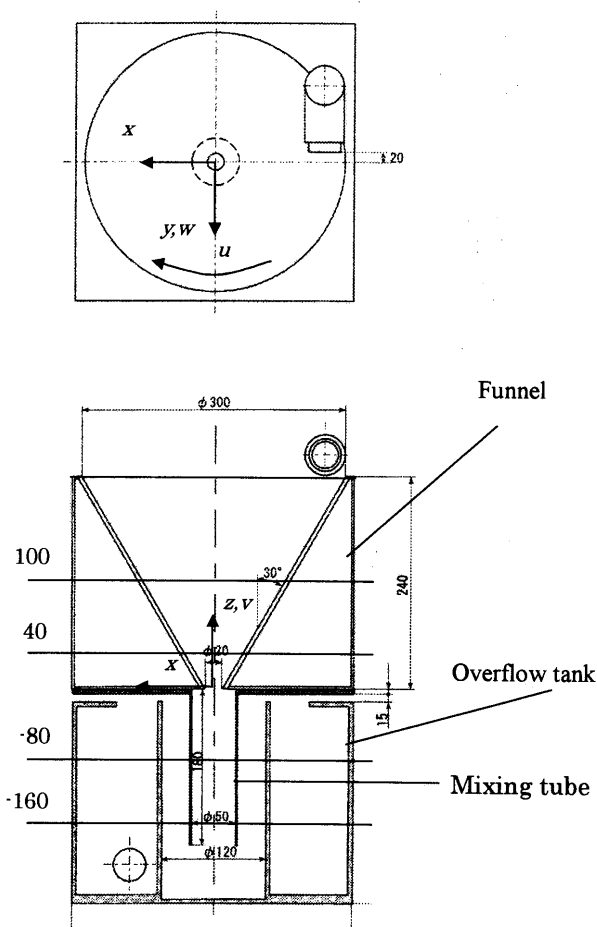


Fig. 2. Experimental apparatus, measuring and calculated positions, showing funnel, overflow tank and mixing tube: inlet tube diameter of 31 mm, inlet flow rate of $1.9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

と混合管内の流動状態をLDV (レーザードップラー流速計) によって測定した。その際、漏斗内測定位置を各高さにおける同一水平面上で90°ごとに角度を変えて測定した。同時にFLUENT Codeを用いた数値解析を行った。乱流モデルはRSMモデル(Reynolds Stress Model)、混相流モデルはVOF (Volume of Fluid) モデルを用いた。

3. 結果と考察

3.1 漏斗内

3.1.1 漏斗内の周方向速度 u の分布

Fig. 3, 4, 6, 7 に図示する測定値は各々、各水平高さにおける90°毎の計測値である。Fig. 3 に漏斗内の出口近傍である $z=40 \text{ mm}$ における周方向速度の半径方向分布を示

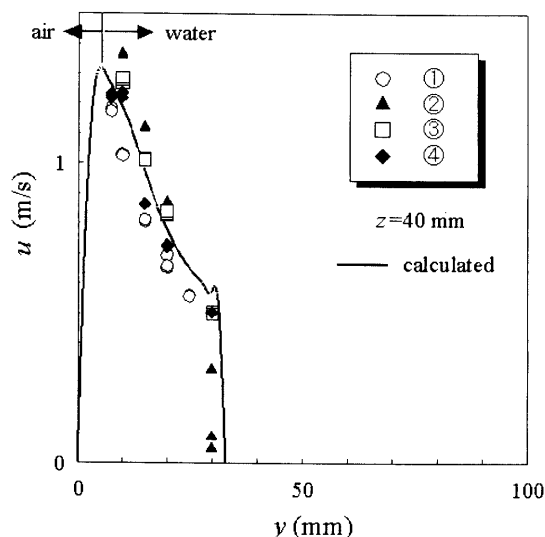


Fig. 3. Comparison of results measured every 90° around axis with calculated ones for tangential velocity u at $z=40 \text{ mm}$.

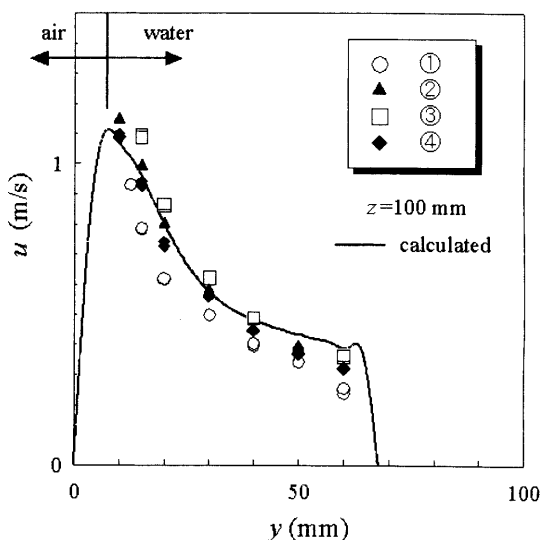


Fig. 4. Comparison of results measured every 90° around axis with calculated ones for tangential velocity u at $z=100 \text{ mm}$.

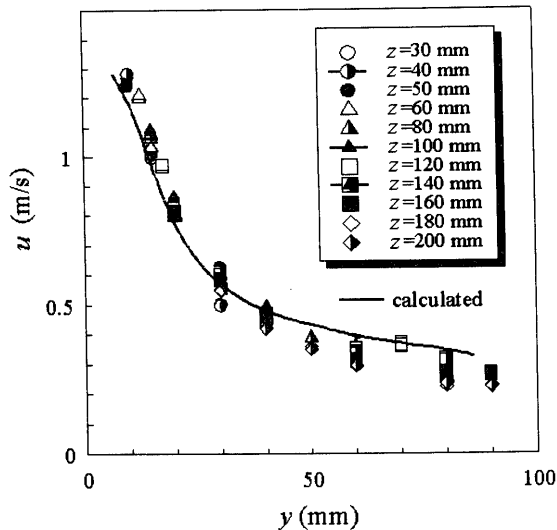


Fig. 5. Comparison of measurement results with calculated ones for tangential velocity u at various axial positions.

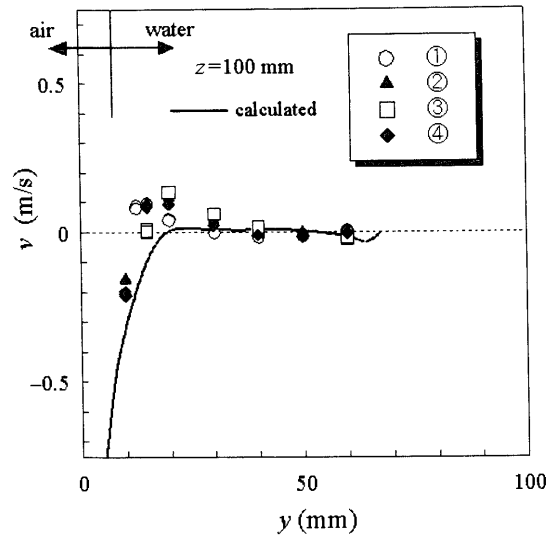


Fig. 7. Comparison of results measured every 90° around axis with calculated ones for axial velocity v at $z=100$ mm.

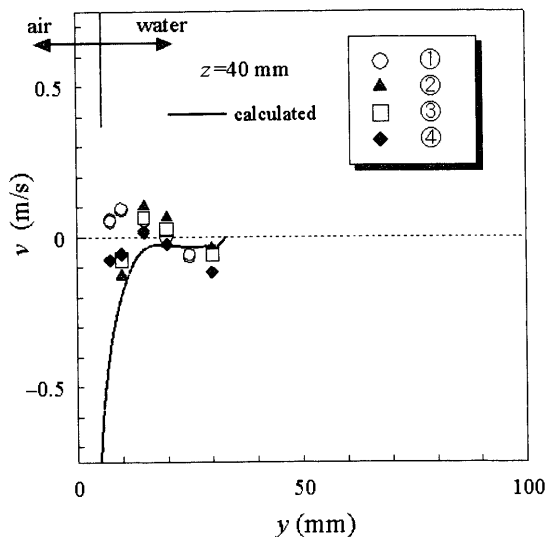


Fig. 6. Comparison of results measured every 90° around axis with calculated ones for axial velocity v at $z=40$ mm.

す。ノズルの位置による測定値にそれほど大きな違いのないことが確認されたので、漏斗内流れはほぼ2次元軸対称流と見なすことが出来る。したがって、2次元軸対称流として数値解析を行った。 y が0に近い、つまり気柱と液体との境界面である自由表面近傍で周速度は最大値を示している。一方、気柱と液体の境界面である自由表面より遠ざかるとほぼ距離に反比例的な周速度であることが分かる。計算値はよく実測値を再現している。漏斗部中間高さ $z=100$ mmにおいても同様な周速度分布を示すことがFig. 4に見られる。Fig. 5に各断面位置における周速度分布を示す。周速度分布は出口からの高さに依存せず、周速度と漏斗軸からの距離の関係が反比例的関係にあり、計算結果は実験結果を良く再現していることが分かる。各水平面高さで90度測定位置を変えた測定値が大略一致しており、軸

対称を仮定した計算結果の再現性の良さを考慮すると、漏斗内流れはほぼ全領域で軸対称流れをしていると言える。

3.1.2 漏斗内の垂直軸方向速度 v 分布

Fig. 6, Fig. 7はそれぞれ漏斗吐出口から距離 $z=40$ mm, $z=100$ mm位置断面における軸方向速度の半径方向分布を示す。実線は数値計算の結果を示している。気柱と液体の境界面である自由表面近傍では比較的大きな下降流が見られるが、それより内側に入ると若干上昇流がみられた後、漏斗壁まで零に近い小さい軸速度分布を示している。速度分布は下降流だけでなく上昇流も存在するなど、非常に複雑な流れ場となっていることが明らかになった。漏斗吐出口の若干の非軸対称性によって、自由表面近傍で計測値と計算値との間に差異が見られる。以上から漏斗部の流れの計算結果は実験結果を再現していると言える。

3.2 混合管内

漏斗吐出口からの環状噴流が混合管内に衝突噴流として突入後の混合管内流れをFig. 8, Fig. 9に示す。漏斗の中心部は気柱を形成して、漏斗で形成された環状噴流は半頂角約 40° の角度で混合液相に突入して、突入時の剪断作用によって空気を巻き込み混合液相に気泡を形成している。混合管内は管内壁面近傍を流下する流れと管軸近傍を上昇する流れ、一種の循環流れが存在している。

3.2.1 混合管内の周方向速度 u の分布

Fig. 10, Fig. 11は漏斗吐出口を原点としてそれぞれ混合管断面位置, $z=-80$ mm, $z=-160$ mmにおける周速度の半径方向分布を示す。混合管内は漏斗吐出口からの衝突噴流の突入による循環流によってエネルギーの平均化が促進される結果、実験結果も計算結果も軸近傍領域がやや膨らんでいるが、概ね半径位置に比例して増大している強制渦の傾向を示している。計算結果は比較的良く実測値を再現している。

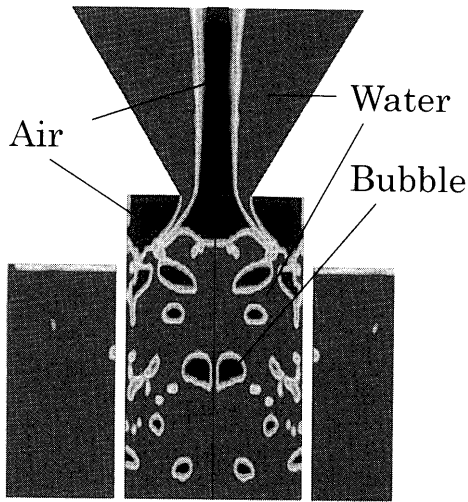


Fig. 8. Calculated annular impinging flow and its resulted two phase flow in mixing tube: water phase is shown as black color and air phase is also shown as gray color.

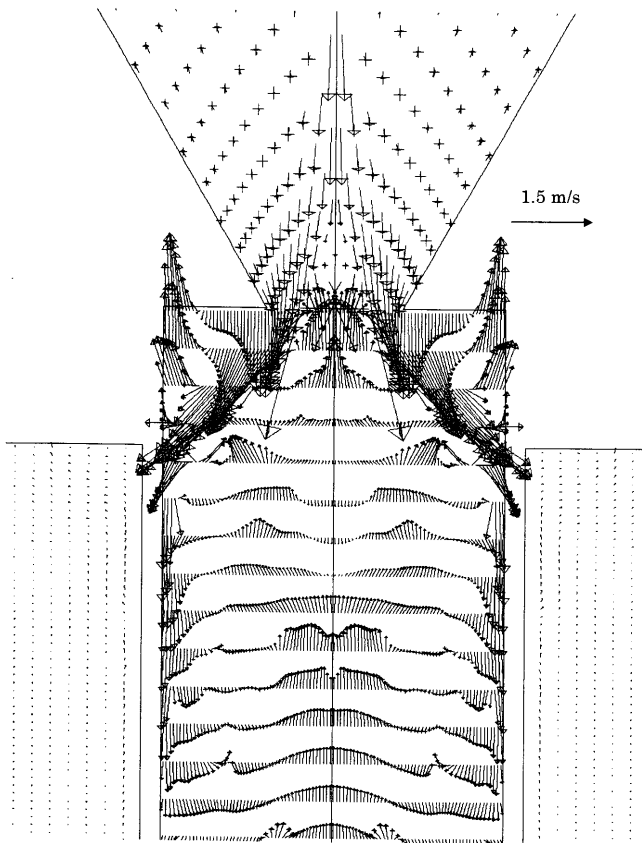


Fig. 9. Calculated annular impinging flow and its resulted flow pattern in mixing tube: arrow length shows velocity magnitude.

3・2・2 混合管内の垂直軸方向速度 v の分布

Fig.12, Fig.13は漏斗吐出口を原点としてそれぞれ混合管断面位置, $z=-80$ mm, $z=-160$ mmにおける軸方向速度の半径方向分布を示す。管軸近傍は若干低速な上昇流であるが、一方、外周域から管壁までは管軸近傍領域の流速より大きな下降流であることが分かった。入り口空気流入

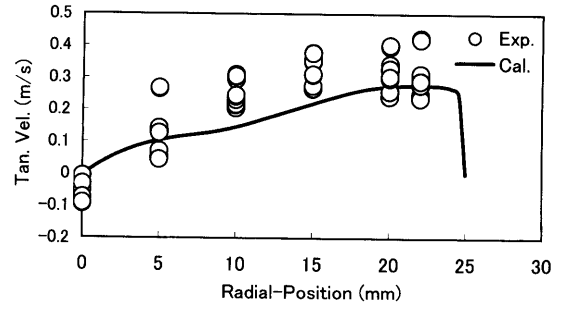


Fig. 10. Radial profile of tangential velocity u at $z=-80$ mm.

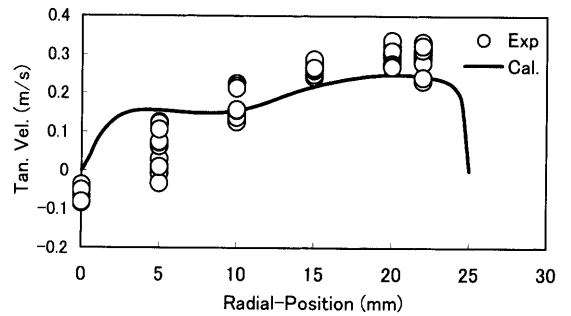


Fig. 11. Radial profile of tangential velocity u at $z=-160$ mm.

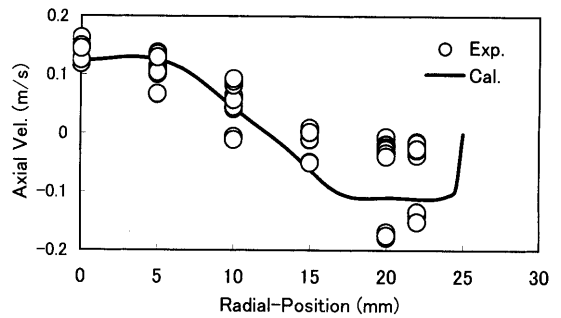


Fig. 12. Radial profile of axial velocity v at position $z=-80$ mm.

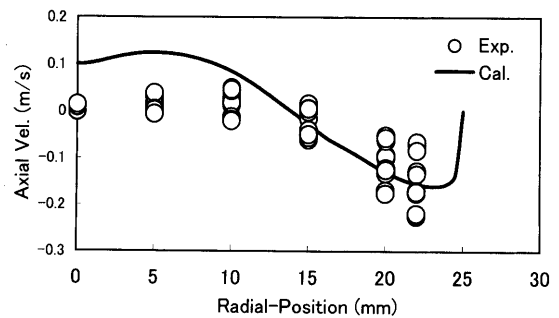
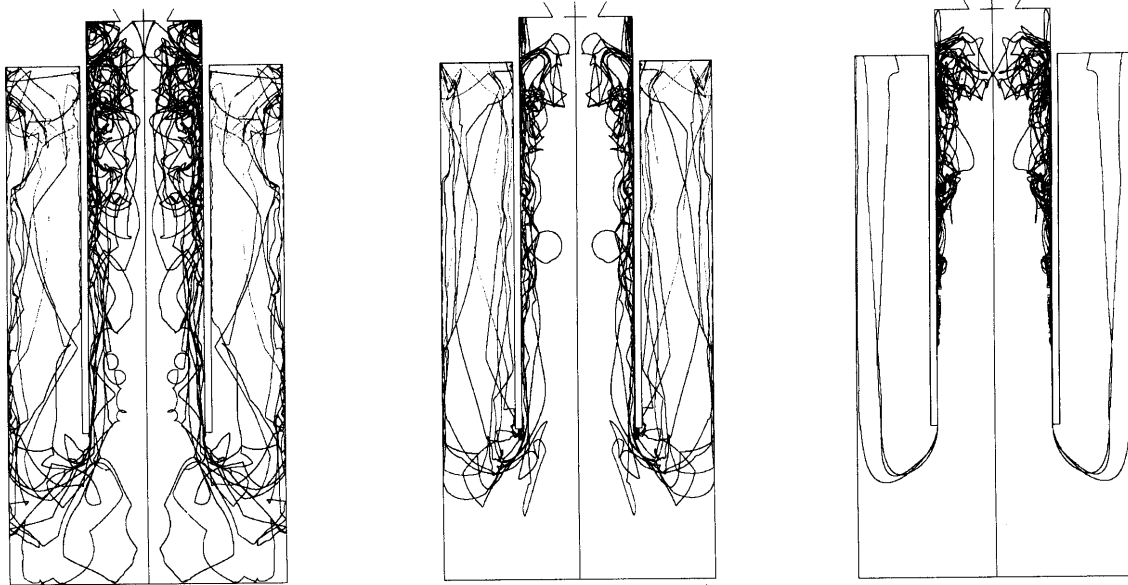


Fig. 13. Radial profile of axial velocity v at position $z=-160$ mm.

量 23.4 L/min (水の2倍の流入量) が管内上流域で観察されるにも関わらず、計算結果は比較的良く実験結果を再現していると思われる。したがって、実験では困難と思われる、混相流領域での混合・分離の定量的推定の手掛かりが得られたのではないと思われる。



(a) Par. Diameter 0.1 mm
Residence time 14 s in liq.

(b) Par. Diameter 0.5 mm
Residence time 7 s in liq.

(c) Par. Diameter 2 mm
Residence time 11 s in liq.

Fig. 14. Particle trajectories in mixing tube for cases: particle density of 500 kg/m^3 . Particles were placed every 5 mm at $z = -40$ mm.

3.2.3 混合管内の粒子の軌跡

Fig.14に密度 500 kg/m^3 で粒径が 0.1 mm , 0.5 mm , 2 mm の粒子が漏斗吐出口より下方 40 mm の位置に 5 mm 間隔で置かれた場合の粒跡を表す。攪拌はされているが、液中の滞留時間は精々 14 秒位であることが分かった。

4. 結論

位置エネルギーによって漏斗内に軸対称流となる旋回流を形成して、漏斗吐出口から環状衝突噴流を生成して混合管内で攪拌作用を行う機構を実験的にも、計算的にも明らかにした。その際、乱流 Reynolds Stress Model モデルを用い

て漏斗内、混合管内の流れや、攪拌の実験結果を再現することが出来た。

文 献

- 1) S.Yokoya, S.Takagi, K.Marukawa, M.Iguchi and S.Hara: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 81.
- 2) 佐々木清人, 井口学, 多田憲司, 高木茂男, 横谷真一郎: 革新的冶金反応装置に関する新たなる展開, 日本鉄鋼協会, 東京, (2002), 21.
- 3) 田中敏宏, 原茂太, 丸川雄浄, 横谷真一郎: 精錬・凝固プロセスの高効率化への革新的技術提案, 日本鉄鋼協会, 東京, (2002), 75.
- 4) T.Tanaka, A.Okamoto and S.Hara: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 152.