The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	漏斗内液体の旋回流動に及ぼす漏斗角および濡れ性の影響
Author(s)	中里, 英樹; 田中, 敏宏; 岡本, 敦 他
Citation	鉄と鋼. 2004, 90(6), p. 306-311
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/26366
rights	©日本鉄鋼協会
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

論文

鉄と鋼 Tetsu-to-Hagané Vol. 90 (2004) No. 6

漏斗内液体の旋回流動に及ぼす漏斗角および濡れ性の影響

中里 英樹*・田中 敏宏*・岡本 敦*2・青野 通匡*2・碓井 建夫*
横谷 真一郎*3・原 茂太*

Effect of Funnel Angle and Wettability on Swirling Flow of Liquid in the Funnel

Hideki ONO-NAKAZATO, *Toshihiro* TANAKA, *Atsushi* OKAMOTO, *Michimasa* AONO, *Tateo* USUI, *Shinichiro* YOKOYA and *Shigeta* HARA

Synopsis : The application of the swirling flow by funnel to the steel refining process has been expected. In order to generate the swirling flow effectively and to maintain stably, it is necessary to examine the optimum conditions from various viewpoints, such as the shape of the funnel. In addition, it is necessary to clarify the effect of the wettability between the solid surface and the liquid on the swirling flow. Using mercury or water, the swirling flow in the funnel has been observed, and the effect of the funnel angle and the wettability on the swirling flow has been investigated. The swirling flow by funnel is formed stably when the funnel angle against the horizontal surface is larger than 60° in spite of the wettability of the funnel with the liquid. When the funnel angle becomes smaller, such as 30°, the swirling flow is affected by the wettability of the funnel. When the wettability between the funnel and the liquid is poor, the stable swirling flow cannot be obtained because of the slip of the liquid on the inner-surface of the funnel. A model calculation for molten iron has also been conducted on the effect of the wettability on the swirling flow. In regard to the liquid flow of the vertical direction, the liquid flows downward at the surface side of the liquid and upward at the vicinity of the funnel. When the wettability of the inner surface of the funnel with the liquid is poor, the liquid flows more intensely. This may be one of the causes that the swirling flow is difficult to be stabilized when the wettability is poor.

Key words: steelmaking; swirling motion; efficient mixing; potential energy; funnel; angle; wettability.

1. 緒言

鉄鋼製錬プロセスにおけるさらなる生産性の向上のためには，スラグ–メタル系の高効率混合・分離に対する新しい技術が鍵となると考えられている。地球環境保護の観点から，近年のエネルギー消費量の削減の要求を踏まえ，これまでまだ積極的には取り入れられていない重力（位置エネルギー）の利用が注目されつつある[1]。横谷らは，水モデルにより，漏斗上部から液体を流し込むことによって旋回流を発生させ，下部に設置した混合槽で固気液混相流体を強撹拌できることを報告している[2–5]。この旋回流による強撹拌・混合プロセスは，重力（位置エネルギー）を利用した自発的流動であり，漏斗型反応器を用いることによって，重力（位置エネルギー）から比較的容易に液体中に旋回流を発生させることが可能であることを示している。また，そのとき旋回流の中心に生じる穴は，水面から混合槽まで達しているので，水面に浮かんでいる発泡スチロールやポリスチレン粒子など，水と極めて濡れ性の悪い低密度粒子でも渦流に巻き込まれる特徴がある[6,7]。酸化性ガスや添加フラックスを漏斗上部から供給した場合，溶鉄と効率よく混合・撹拌することが可能であると想定される。すなわち，旋回流は固-液，気-液系等における混合・分離に対して効果的であり，溶銑予備処理などの鉄鋼製錬プロセスへの応用が期待される。ここで，良好な旋回流を効果的に発生させ，効率的に維持するため，漏斗の形状などさまざまな視点から最適条件を検討する必要がある。また，一般に液体金属は固体壁と濡れないため，旋回流に対して悪影響を及ぼす可能性がある。そこで旋回流に及ぼす固体壁と液体の濡れ性の影響を明らかにする必要がある。本研究では，水銀と水を用いて，異なった円錐部の角度をもつ漏斗に対する旋回流の様子を調べた。液体の旋回流動に及ぼす濡れ性の影響について調べるため，表面の濡れ性が異なる漏斗を作成して実験を行い，また溶銑を対象としたモデル計算を行った。

2. 実験方法

使用した装置の概略図をFig. 1に示す。水銀，水を貯めておくタンクはPET（ポリエチレンテレフタレート）製である。また，タンクは上下に移動可能であり，液面と漏斗の高さを変えることが可能である。ノズルには内径3 mmのガラス管を利用した。一回の実験で，約500 mLの水または約800 gの水銀を使用した。使用した3種類の漏斗寸法をFig. 2に示す。実験は，円錐部の角度が水平面に対し

平成15年9月30日受付　平成15年12月22日受理 (Received on Sep. 30, 2003; Accepted on Dec. 22, 2003)
* 大阪大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Osaka University, 2–1 Yamadaoka Suita 565–0871)
*2 大阪大学大学院生 (Graduate Student, Osaka University)
*3 日本工業大学機械工学科 (Department of Mechanical Engineering, Nippon Institute of Technology)

て60°である通常の漏斗に対して，その角度を変化させた場合を考えるため，円錐部の角度が水平面に対して(a) 30°, (b) 60°, (c) 80°の3種類の角度をもつ漏斗を用いて行った。漏斗の材質は，60°のものはガラス製，30°, 80°のものは硬質塩化ビニール製である。ノズルを漏斗の淵に横向きに配置し，流れ出る水銀または水に水平面に沿う回転方向の初速を与えるようにし，水銀または水をボトルに入れノズルから流出させた。ノズルの位置や高さなどの条件を少しずつ変え，数回から十数回実験を行なった。漏斗内における流れの様子をデジタルビデオカメラを用いて撮影し，回転中心にできる穴に注目して旋回流の発生の様子を観察した。また，濡れ性を変化させるために，サンドペーパーと，ろうを用いて漏斗表面の性状を変化させた。漏斗にかけるサンドペーパーの粗さを変えることによって，表面の濡れ性が異なる漏斗を作製し，実験を行なった。それぞれの実験条件をTable 1に示す。漏斗と水の濡れ性は，紙やすりをかけた硬質塩化ビニール板上に水滴をつくり，それぞれの接触角を観察することによって判断した。また，水銀を用いた60°の漏斗による旋回流実験ではガラスビーズ（直径約3 mm）およびプラスチック球（直径約6 mm）を投入することによって，それらが流れに巻きこまれる様子を観察した。

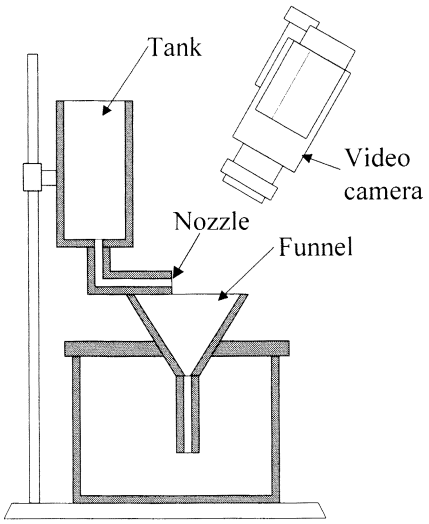
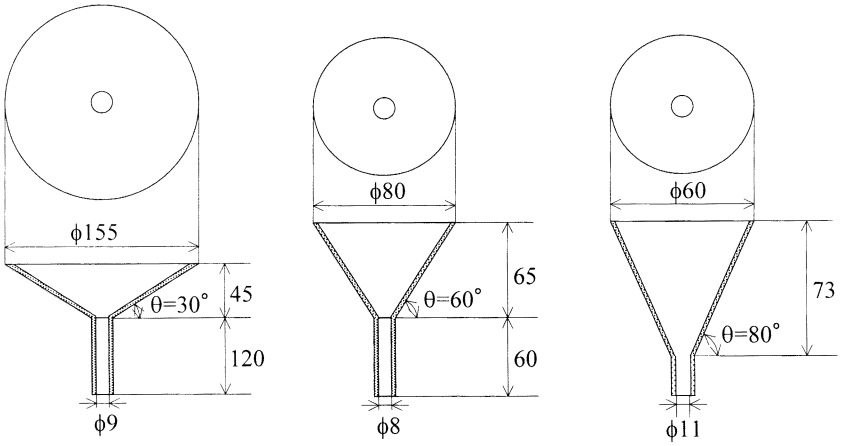


Fig. 1. Schematic cross section of experimental apparatus.

3. 旋回流動に及ぼす濡れ性の影響に関するモデル計算

旋回流動に及ぼす濡れ性の影響に関して，溶銑を対象としたモデル計算を以下の仮定のもとで行った。濡れ性は，固体壁–液体間の滑りに対して影響を及ぼすと考えられ



(a) θ = 30°
(Made of rigid PVC)

(b) θ = 60°
(Made of glass)

(c) θ = 80°
(Made of rigid PVC)

(unit : mm)

Fig. 2. Schematic cross sections and dimensions of the funnels used in the present study.

Table 1. Experimental conditions.

Liquid	Inner surface of the funnel	Funnel angle		
		(a) θ = 30°	(b) θ = 60°	(c) θ = 80°
Mercury	No treatment (**Case A**)	○	○	
Water	No treatment (**Case A**)	○	○	○
	Ground on a polishing board of No.1500 (**Case B**)	○		
	Ground on a polishing board of No.1000 (**Case C**)	○		
	Ground on a polishing board of No.800 (**Case D**)	○		
	Coated by wax (**Case E**)	○	○	○

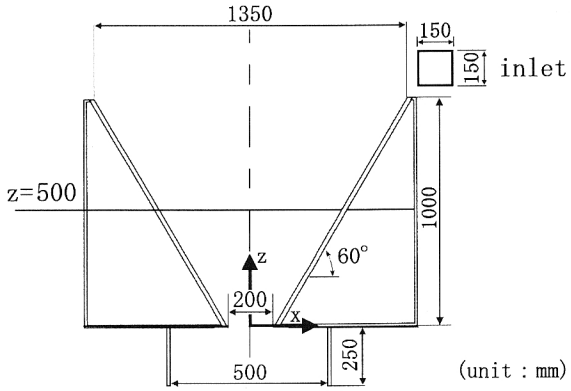


Fig. 3. Dimension of the funnel used in the present simulation.

る。そこで，通常の濡れる場合に対しては壁面で流体の速度を0（No slipモデル），完全に濡れない場合に対しては壁面のせん断応力を0（Slip モデル）と仮定し，数値解析を行った。Fig. 3に計算する際に定めた漏斗の寸法を示す。円錐部の角度は水平面に対して60°とした。数値解析には市販のCFDコード (FLUENT 6.0) を用い，軸対称渦モデルとして計算した。漏斗の格子点数は半径方向30点×軸方向85点である。乱流モデルは計算初期に標準k–εモデルを用い，仕上げにレイノルズ応力モデルを用いた。一般的にk–εモデルは渦粘性の効果を等方的にかつ過大に評価される[8]が，漏斗内流れは旋回流である。ゆえに，非等方的な評価を行うレイノルズ応力モデルを用いることにより，シミュレーションの精度を向上させた。また，混相流モデルにはFLUENT 6.0で使用可能な流体体積 (VOF) モデルを用いた。液相は仮想溶銑（密度6500 kg/m^3, 粘度0.006 kg/(m·s)），気相は空気（密度1.225 kg/m^3, 粘度1.789×10^{-5} kg/(m·s)）とし，溶銑の表面張力は1.4 N/mとした。流入境界条件は2次元軸対称性が満足され，流れが全周方向から一様に流入すると仮定する[8]。流量は 1.23 m^3/min (8 t/min) とした。その半径方向流入平均速度は0.03224 m/s，周方向流入平均速度は0.9111 m/sである。

4. 結果と考察

4・1 水による旋回流

円錐部分が水平面となす角が60°，80°の漏斗を用いて旋回流の発生実験を行った。濡れ性の異なる2種類の漏斗どちらを用いた場合でも，ノズルの位置や流速に関わらず安定した旋回流を発生した。

一方，円錐部分が水平面となす角が30°の漏斗を用いて旋回流の発生実験を行った場合，漏斗の濡れ性によって旋回流の発生状況が変化した。実験に用いた5種類の漏斗と水との接触角を調べた結果をFig. 4に示す。Fig. 4において，処理無し (Case A) からろうを塗布したもの (Case E) まで，接触角は57°から130°に増大した。したがって，A→B→C→D→Eの順で水との濡れ性がよいと判断できる。何も処理を行っていない漏斗を用いた場合 (Case A) とろうを塗布した場合 (Case E) の旋回流の様子を表す連続写真をFig. 5に示す。何も処理を行っていない漏斗を用いた場合，安定した旋回流が得られる。一方ろうを塗布した漏斗を用い

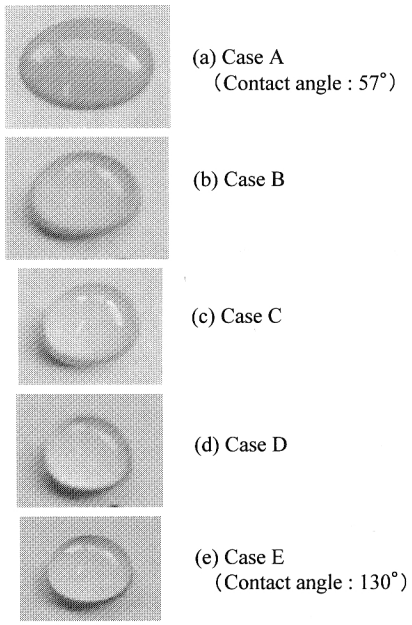


Fig. 4. Shape of the water droplets on the PVC plates used in Cases A to E.

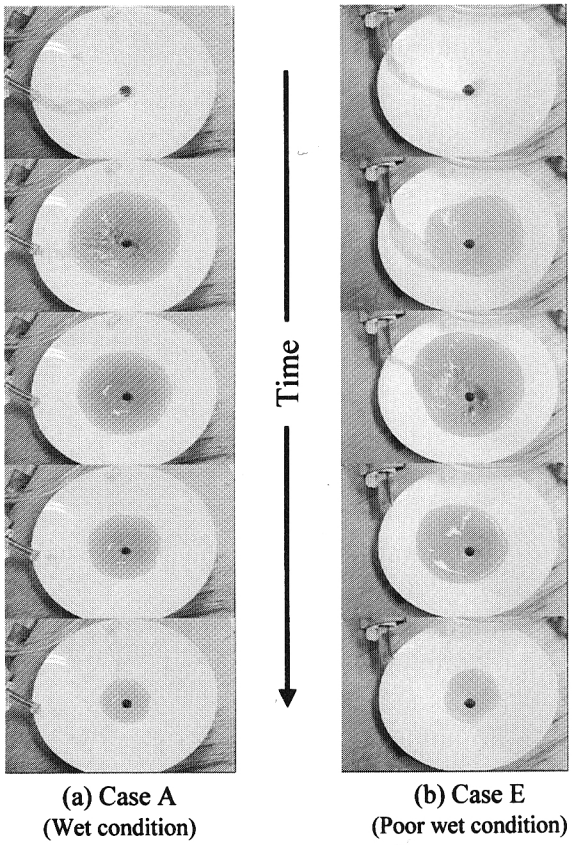


Fig. 5. The variation of the swirling flow of water with time in the case of θ (funnel angle)=30°.

Table 2. The formation possibility of the stable swirling flow by water in the case of θ (funnel angle)=30° and the wettability of the inner surface of funnels with water.

Case *	Case A	Case B	Case C	Case D	Case E
The formation possibility of the stable swirling flow	◎ (High)	○ (60～40%)	○ (60～40%)	△ (Low)	△ (Low)
Wettability (Contact angle)	Good (57°)	←			Poor (130°)

* : The details of Cases A to E are shown in Table 1.

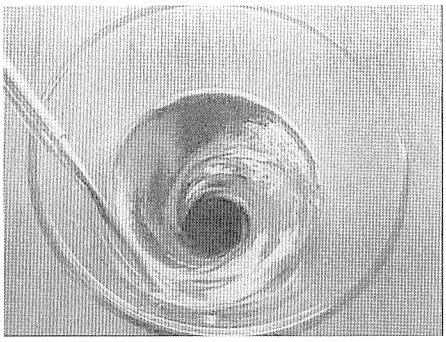


Fig. 6. The swirling flow of mercury in the case of θ (funnel angle)=60°.

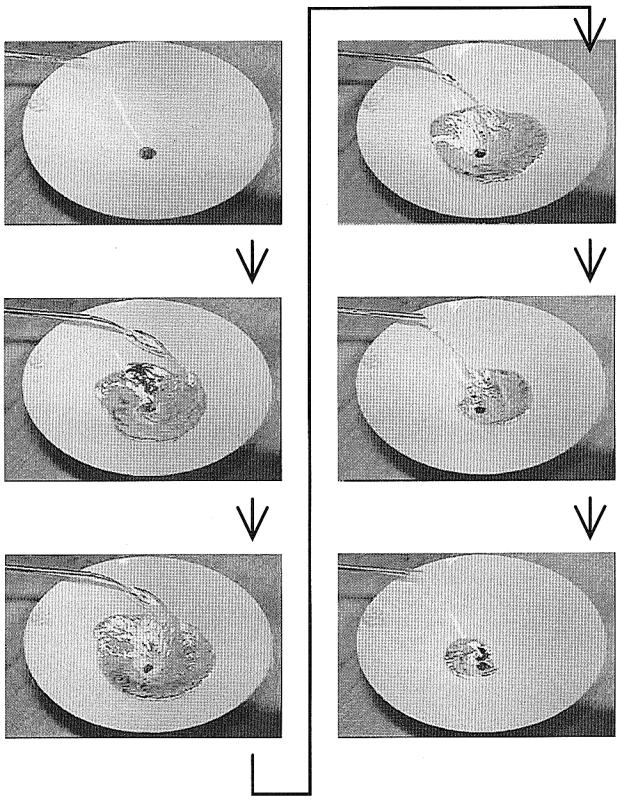


Fig. 7. The variation of the swirling flow of mercury with time in the case of θ (funnel angle)=30°.

た場合，液体の円形が時間変化し，旋回流が安定しない様子が観察できる。これら5種類の漏斗を用いて行った実験から得られた濡れ性と旋回流の発生状況（安定した旋回流の発生頻度）をTable 2に要約する。Table 2中2重丸(◎)は高い頻度で安定した旋回流が発生することを示し，丸(○)は約60～40%の確率で発生することを示す。三角(△)は比較的低い発生確率であったことを示す。30°の漏斗においては濡れる表面の漏斗の方が旋回流が安定する確率が高い。濡れ性の悪い漏斗での旋回流が安定しない原因として，濡れ性の違いによる壁面への流体の吸着力の差が考えられる。濡れのよい壁面に接触した流体は壁面と引き合い移動を妨げられるが，濡れの悪い漏斗上では流体は容易に移動することができる。すなわち，濡れの悪い傾斜上の水滴は，濡れの良い傾斜上のそれよりも運動が起こりやすく，斜面上で滑る。そのため，旋回流の中心が漏斗の中心からずれてしまう確率が高くなり，旋回流が安定しにくいと考えられる。

4・2　水銀による旋回流

60°の漏斗を用いたときの旋回流の様子をFig. 6に示す。水銀は漏斗内を勢いよく旋回し，ノズルの位置や流速に関わらず安定した旋回流を発生した。旋回流の中心に発生する穴の存在もはっきりと確認された。また，ガラスビーズ（直径約3 mm）およびプラスチック球（直径約6 mm）を投入すると，それらが直ちに流れに巻きこまれる様子が観察された。すなわち，液体金属においても添加フラックスは容易に混合槽に達することが期待できる。

一方，30°の漏斗を用いたときの水銀の旋回流の様子を表す連続写真をFig. 7に示す。水銀は漏斗（ガラス製または硬質塩化ビニール製）やノズル（ガラス製）内を滑らかに運動し，流れの中心が漏斗の中心からずれてしまい，安定した旋回流を得ることができなかった。壁面と流体が滑るということは，壁面上で流体が速度を持つということである。一般に，壁面と流体が濡れる場合は壁面上での速度を0として粘性抵抗を計算する。しかし，濡れない場合は壁面上で速度を持ち，正味の粘性抵抗の値が濡れる場合に比べて非常に小さくなると考えられる。水銀は，ガラス・塩化ビニールとは濡れにくく，このことが漏斗やノズル内で水銀が滑る理由と考えられる。

上記の結果より，円錐部と水平面がなす角が60°以上になると濡れ性に関わらず旋回流を発生することがわかった。また，逆に緩やかな角度になると濡れ性の影響を受けて，安定した旋回流を発生する確率が低くなることが明らかとなった。緩やかな角度の漏斗では，液体の水平方向の移動が容易になるために旋回流の中心が漏斗の中心軸からずれてしまい，旋回流が安定しにくい。また，漏斗と流体の濡れ性が悪いと，流体が漏斗上を滑り容易に移動することができるために，安定した旋回流を発生する確率は下がる。

4・3　旋回流動に及ぼす濡れ性の影響に関するモデル計算

漏斗角60°の場合の溶銑を対象とした本モデル計算では，濡れる場合，濡れない場合ともに安定な旋回流が得ら

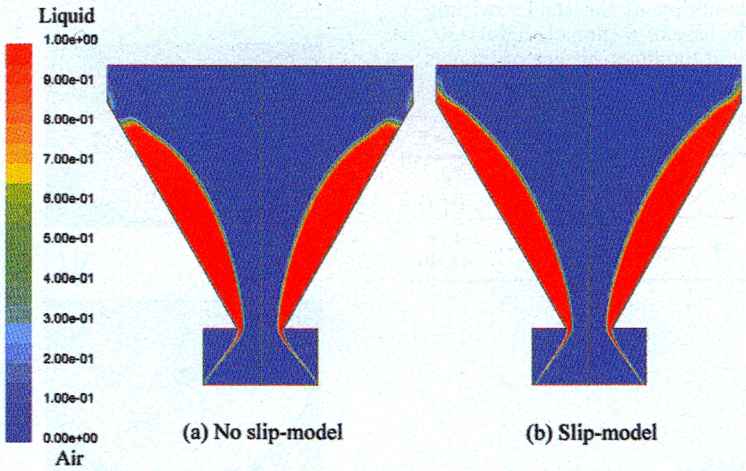


Fig. 8. The simulation results of the distribution of molten iron and air in the funnel.

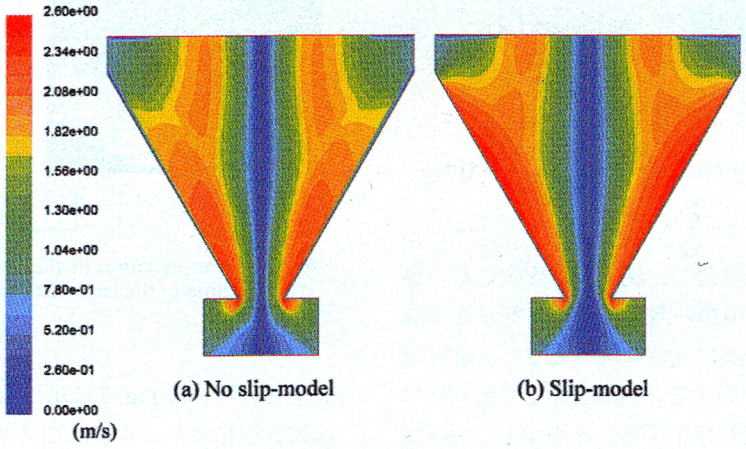


Fig. 9. The simulation results of the tangential velocity in the funnel.

れた。Fig. 8に，(a) 濡れる場合（No Slipモデル）および(b) 濡れない場合（Slipモデル）のモデル計算の結果から得られた液相分布を示す。液相の形状に若干の差異がみられ，濡れない場合では，濡れる場合よりも液相の厚みが小さくなり，漏斗上部まで液相が存在することが分かる。Fig. 9に，周方向速度分布の計算結果を示す。液相の周方向速度分布には顕著な差異がみられる。液相部分について互いに強制渦に近い速度分布を示すが，No Slipモデルでは漏斗下部にしか現れなかった高速度の領域がSlipモデルでは上部にまで及んでいる。すなわち，濡れる場合では，吐出口に近づくにつれて周速度が増すのに対し，濡れない場合では高さ位置に関係なく壁面近傍で周速度が大きく，壁面から離れるにつれ小さくなる速度分布となっている。Fig.10に，漏斗高さZ=500 mm（Fig. 3参照）の位置における漏斗中心から半径方向に対する液相の周速度，軸速度分布を示す。Fig.10(a)からも，濡れる場合は壁面近傍を除いて液相の周速度分布が余り変化しないのに対し，濡れない場合は漏斗壁面からの距離に対応して変化することが確認できる。Fig.10(b)において軸速度はZ軸方向を正としてお

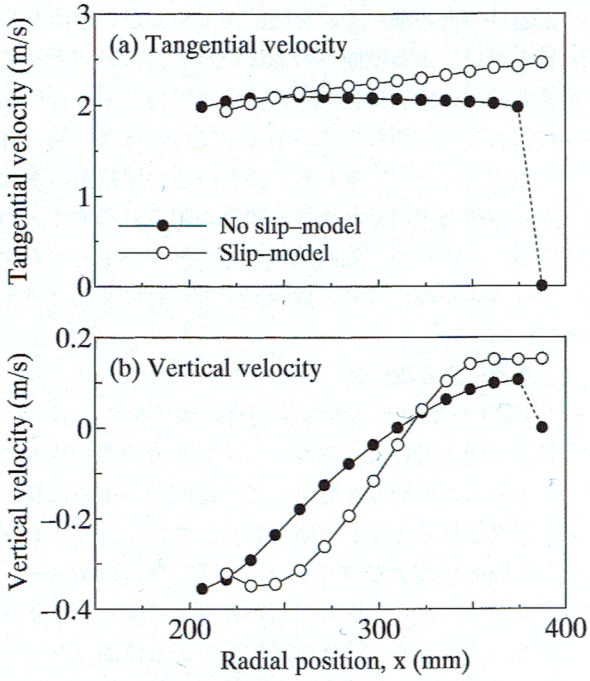


Fig. 10. Radial profile of the tangential and vertical velocities at z=500 mm.

り，正の値は上昇流，負の値は下降流を表す。濡れる場合と濡れない場合で，壁面における速度が異なるために，それに起因すると思われる速度分布の変化がみられる。軸速度は，漏斗壁面近傍で上昇流，液相表面側で下降流となるが，容器が濡れない場合，その半径方向の速度変化が大きくなる。実験における旋回流の安定性と本計算結果を直接比較することはできないが，実験を行う際，ノズルからの液体流入条件等に若干の変動が生じるので，容器が濡れない場合の方が流動が激しいことが，旋回流が安定しにくい要因の一つである可能性が考えられる。また漏斗下部に進むにつれ，濡れる場合と濡れない場合での周速度，軸速度分布の差異は小さくなり，$Z=100$ mmの位置では漏斗壁面近傍を除き，ほぼ一致することが確認された。

5. 結論

水および水銀を用いて漏斗内に発生する旋回流の観察および溶銑を対象としたモデル計算を行い，漏斗内液体の旋回流動に及ぼす漏斗角および濡れ性の影響を調べた結果，以下の結論を得た。

（1） 水平面に対する漏斗の円錐部の角度が60°以上になると，旋回流は漏斗の濡れ性にかかわらず安定し，液体金属でも安定した旋回流を発生させられる。

（2） 水平面に対する漏斗の円錐部の角度が30°になると，旋回流は漏斗の濡れ性の影響を受ける。漏斗と液体の濡れ性が悪い場合は，流体が滑ることによって旋回流が安定しない。

（3） 軸速度は，漏斗壁面近傍で上昇流，液相表面側で下降流となる。容器が濡れない場合の方が流動が激しく，液体流入条件が変動した際に，旋回流が安定しにくい要因の一つであると考えられる。

文　献

1） K.Marukawa, S.Hara and M.Sano: *ISIJ Int.*, **41** (2001), S36.
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，革新的高効率混合・分離リアクター創出研究会編，日本鉄鋼協会，東京，(2002), 13, 21.
3） 井口　学，佐々木清人，多田憲司，高木茂男，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), 45, 75.
4） S.Yokoya, S.Takagi, K.Marukawa, M.Iguchi and S.Hara: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 81.
5） S.Yokoya, K.Tada, S.Takagi, K.Sasaki and M.Iguchi: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 905.
6） S.Yokoya, S.Takagi, H.Souma, M.Iguchi, Y.Asako and S.Hara: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 1086.
7） S.Yokoya, S.Takagi, M.Iguchi, K.Marukawa and S.Hara: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 572.
8） O.Kitamura and M.Yamamoto: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **64** (1994), 4002.