

枚葉式半導体洗浄機モデル内渦構造の PIV 計測

清水 義也^{*1}, 柳瀬 眞一郎^{*1}, 河内 俊憲^{*1}, 森 洋平^{*1}, 福田 修也^{*1}PIV measurement of vortical structures
in a model of semiconductor single wafer cleanerYoshiya SHIMIZU^{*1}, Shinichiro YANASE^{*1}, Toshinori KOUCHI^{*1},
Yohei MORI^{*1} and Naoya FUKUDA^{*1}^{*1} Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University
3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama 700-8530, Japan

Received 27 January 2014

Abstract

In a single wafer spin cleaner, the wafer is rotated at high speed to spin off ultrapure water and clean air is blown perpendicular onto the surface to dry the wafer. Interaction between the rotating wafer and blown air generates vortices and the recirculation flow due to the vortices may cause reattachment of contaminants on the wafer surface. Therefore, we experimentally investigated vortical structures and the conditions of their formation in a modeled cleaner by using particle image velocimetry (PIV). The model was a 330 mm diameter rotating disk in a 520 mm diameter cylindrical stationary housing. Laminar blown air was from the housing inlet onto the rotating disk. The rotating speed of the disk was changed up to 2000 rpm and the blown air rate was up to 3.0 m³/min. Our PIV data show that vortices were generated on the upper and lower sides of the disk near the outer edge and collided with each other to form a large one. Additional large scale vortices were observed on the housing wall for the rotating speed of the disk above 200 rpm. The scale of the vortices increased and their generation frequency increased as the rotating speed increased. This work also investigated the optimum blown air flow rate against the rotating speed of the disk to prevent from generating the vortices.

Key words : Single wafer cleaner, Semiconductor, PIV, Rotating disk, Vortex

1. 緒 言

半導体デバイスを作る前工程は 400 程度あり、各工程間で半導体のゲートや配線間をショートさせる恐れのある微小パーティクルを取り除くために洗浄が行われる。そのため洗浄性能は最終的に作られる半導体の性能を左右する。これまで半導体の洗浄は 25 枚のウェハを一度に洗浄するバッチ式洗浄が一般的に用いられてきたが、近年の半導体の微細化、集積化、そしてウェハの大口径化に伴い、枚葉式洗浄と呼ばれるウェハを 1 枚毎に洗浄する方法も使用されている。枚葉式洗浄ではウェハを回転させ、各種薬液を塗布し洗浄を行う。そして超純水でウェハをリンスしたあと、ウェハを高速回転させ超純水を振り切り乾燥させる。この方法は、ウェハを 1 枚毎に処理を行うため、処理室の清浄度を保ちやすくクロスコンタミネーションの心配が少ない。その一方で、振り切り乾燥時に超純水のみストや機械部からの微小パーティクルがウェハに再付着し、半導体素子の欠陥を引き起こすことが問題となる。そのため枚葉式洗浄では、ウェハの回転やチャンバ形状による気流の乱れを最適化する必要がある。半導体の製造装置内の流れに関する研究(木村他, 2006)(荻野他, 1997)は少なく、特に枚葉式洗浄機内の気流に関する研究論文は著者らの知る限り見当たらない。また企業において、枚葉式洗浄機内の気流に関して研究は進められていると考えられるがその詳細は公になることはない。企業では、通常重要な処理チャンバの形状や処理条件は経験的に決められていることが大半であり、洗浄性能を左右する気流や渦構造の調査、これらを基にした装置の最適化は行われていない。

No. 14-00046 [DOI: 10.1299/transjsme.2014fe0197]

^{*1} 正員, 岡山大学 大学院 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)

E-mail of corresponding author: dns19222@s.okayama-u.ac.jp

本研究では図1に示すような、実際に半導体の製造に使用されている洗浄機の大きさを変えずに簡素化した実験装置を作り、振り切り乾燥時にウェハ上部から流入する空気の流量(以下、本論文ではダウンフロー流量と呼ぶ)とウェハの回転数がウェハ周りの気流に及ぼす影響をPIVにより調査した。荻野らの研究(荻野他, 1997)や著者らの以前の研究(Shimizu, et al., 2010)(森他, 2012)(福田他, 2013)では、回転する円盤の外周部にミスト等の再付着を引き起こしうる循環流が存在することが示唆されていた。本研究ではそれら渦構造をより明確に捉え、ダウンフロー流量やウェハ回転数がそれら渦の発生や構造にどのような影響を与えるかを調べて、洗浄性能を向上させる方法を見出した。

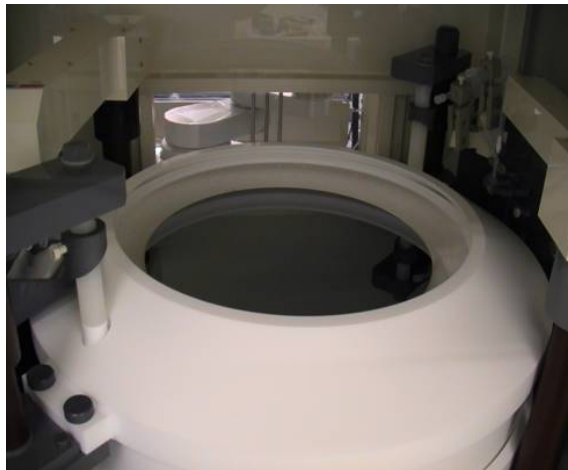


Fig. 1 Single wafer spin cleaner of industrial use.

2. 実験装置と測定方法

2・1 実験装置

半導体の枚葉式洗浄装置は、各社独自の技術を取り入れ、形状も互いに異なっている。洗浄装置内部で発生する普遍的な流れをこのような実機そのものを用いて把握することは困難である。本研究では図1に示す実在する洗浄装置を例にとりサイズを変えずに複雑かつ多様な形状を最も簡素化した装置(図2)を作り実験を行った。簡素化したモデルを用いた目的は、装置内部で発生する普遍的な流れ、また基礎的な渦構造とそれに伴う流動現象を捉えるためである。実験装置ではウェハとウェハを保持するチャックテーブルを直径 $d = 330 \text{ mm}$ の1つの円盤として簡素化した。また円盤は直径 $D = 520 \text{ mm}$ の外筒に囲われ、これが洗浄装置の内壁を模擬している。ダウンフローとして円盤に吹き付けられる空気は、実験装置内を送風機により循環している。送風機から排出された空気はオリフィス式流量計を通り、円盤を設置した外筒の外に設けられた流路の下部にある流入口に流入する。外筒外側を流れた空気は、円盤の上流に設置されたハニカムにより整流され、およそ 2000 mm の助走区間を経て、気流の乱れを減衰したのち、ダウンフローとして観測領域に流入する。このダウンフローは円盤上流ではトレーサの動きの観測から層流であることを確認している。円盤下部には排気カバーが設置され、その内部に3つの排気ポートがあり、そこから空気は送風機へと戻る。図3にこの排気ポートとレーザシートの位置関係を示す。なお図は実験装置を円盤上面から見た平面図である。流れの状態は排気ポートのある所とない所で異なることが予想されるが、現在のところ排気ポートの流れ場に対する影響は分かっていない。本研究は洗浄装置内の基礎的な渦構造をまずは捉えることを目的とし、レーザ入射位置は固定し、撮影領域は図中右側の排気ポートに近い領域に限定した。なおダウンフロー流量はオリフィス式流量計により計測している。オリフィス式流量計の測定誤差の大半はオリフィス前後の差圧の計測であり、使用した圧力計の測定精度から本実験で設定したダウンフロー流量の精度は、 $0.5 \pm 0.3 \text{ m}^3/\text{min}$, $1.0 \pm 0.11 \text{ m}^3/\text{min}$, $2.0 \pm 0.06 \text{ m}^3/\text{min}$, $3.0 \pm 0.04 \text{ m}^3/\text{min}$ である。

流れの可視化には、プロピレングリコール水溶液をヒータで温め霧化したスモークを用いた(流れの可視化学会編, 1986)。装置内の気流は循環するため、トレーサも装置内を循環し留まる。このトレーサをレーザ光源とハイスピードカメラを用いた非定常PIV(可視化情報学会編, 2002)により、観測領域の流動を調べた。図4にカメラとレーザシート光源の設置状態を示す。光源には最大出力 2 W の半導体励起固体レーザ(DANTEC社製

RayPower 2000) を連続発振させ使用した。レーザビームはレンズ群によりシート形状になり、円盤の回転軸を通るように入射する。最高シャッター速度 50 μ sec, 最大撮影フレームレート 3000 fps のハイスピードカメラ (DITECT 社製 HAS-L1) はレーザシートに対して垂直になるように固定し、任意の領域を撮影可能なようにトラバースできる機構を有している。なお本実験では、粒子は外筒の曲面を通して撮影されるため、外筒壁近傍の画像に最大で半径方向に 20%程度ゆがみが生じる。本実験ではこの外筒の曲面に対する補正は行っていない。しかしながら、この曲面の影響は半径方向にのみ限定され、回転軸方向へは影響がないため、補正の有無によって後述する「渦の生成、円盤回転数と逆流の発生との関係」に関する結果は変わらない。

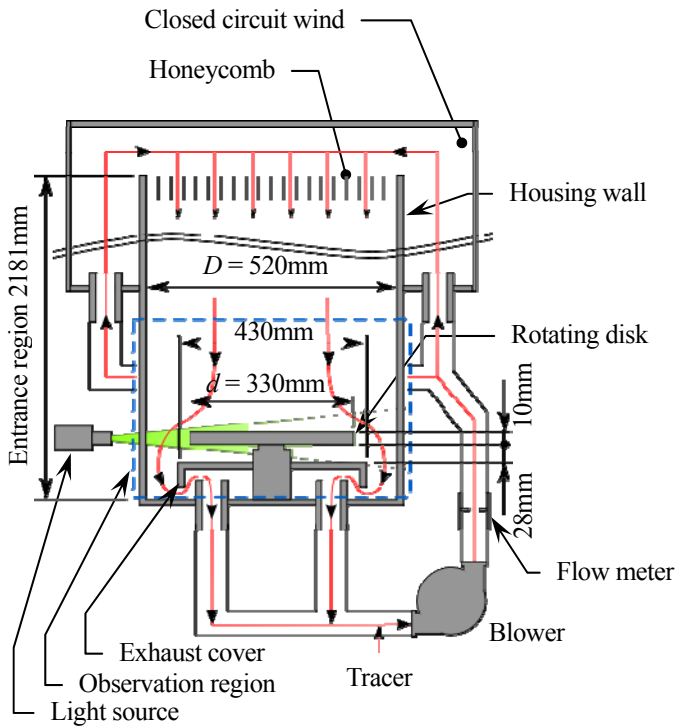


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus.

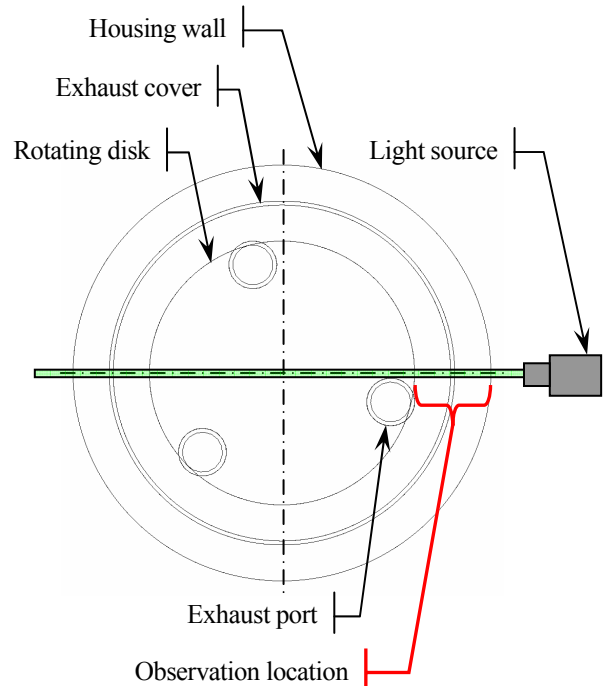


Fig. 3 Positions of exhaust ports and laser light sheet.

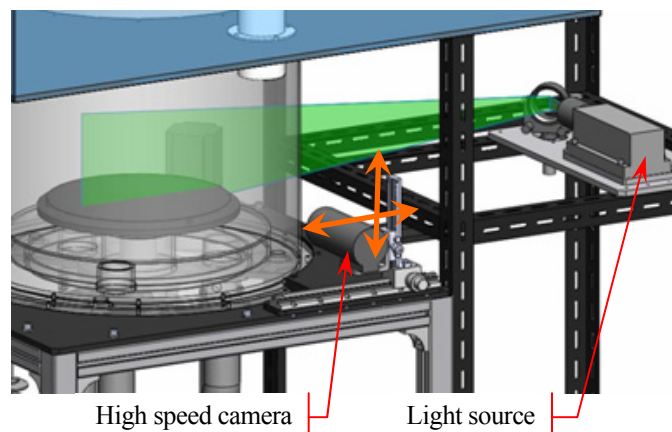


Fig. 4 Setup of light source and camera.

2・2 測定方法

図5に本実験で行った観測領域を示す。洗浄機内の流れで問題となるのは、微小パーティクル等をウェハに再付着させる原因となり得るウェハ周りや洗浄機内壁に形成される循環流である。そこで本実験では円盤から外筒内壁までの領域において、どのような流れが生じているのかを明らかにするために、観測領域 OR1-OR7 において PIV を行った。座標系は円盤の中心を原点とし、半径方向に r 軸、垂直方向に z 軸とする。なお、図5に示すサンプリングポイントは外筒壁面付近での速度の時間的変化を確認するために回転軸から 282.85mm、回転円盤の上面より 12.85mm に設定した空間内の点である。この位置は円盤上面より上部で、さらに図7の OR6 で示される外筒壁面近傍に発生する渦の動きを精度よく捉えることを考慮して OR6 の中央に設定した。

実験は、円盤の回転数を 0-2000 rpm、ダウンフロー流量 Q を 0.5-3.0 m³/min まで変化させ行った。このとき円盤外周の回転速度 $\omega d/2$ は 0-34.56 m/s で、ダウンフローの管断面平均流速 U_a は 0.039-0.24m/s である。なお円盤回転数 2000 rpm における円盤外周の回転レイノルズ数 $Re_d (= \omega d^2/4\nu)$ は 380000 で、ダウンフロー流量 $Q = 3.0$ m³/min における下降流レイノルズ数 $Re_D (= U_a D/\nu)$ は 8100 となる。ここで ν は空気の動粘性係数である。

撮影ではフレームレートを 500-2000 fps、解像度を 320×240 pixels と 240×180 pixels から実験条件に適したものを選択し、およそ 10-26 s 間撮影を行った。また図5には、各撮影領域における解像度とフレームレート、撮影時間を併せて示してある。OR1, OR2, OR5 は図6と図7で示す結果の撮影条件を示す。OR6 と OR7 はそれぞれ OR3 と OR4 より小さな領域でこれら領域と重なっている。円盤の回転数が速くなると流速が速くなり、PIV を行うためにフレームレートを大きくする必要がある。しかしながら、本計測で使用したカメラではフレームレートを大きくした際、低フレームレート時と同じ解像度を維持出来なかった。そのために OR6 と OR7 のように撮影領域が小さくなった。具体的には $U_a = 0.039$ m/s であつ $\omega d/2 > 5.18$ m/s、または $U_a > 0.078$ m/s のときに OR6 や OR7 の撮影領域・撮影条件を使用した。PIV では検査領域を 32×32pixels、探査領域を 42×42pixels とし、ベクトルは検査領域を 75%オーバーラップさせながら、再帰的相互相関法を用いて算出した。なおスケールングファクタは 0.14 mm/pixel である。

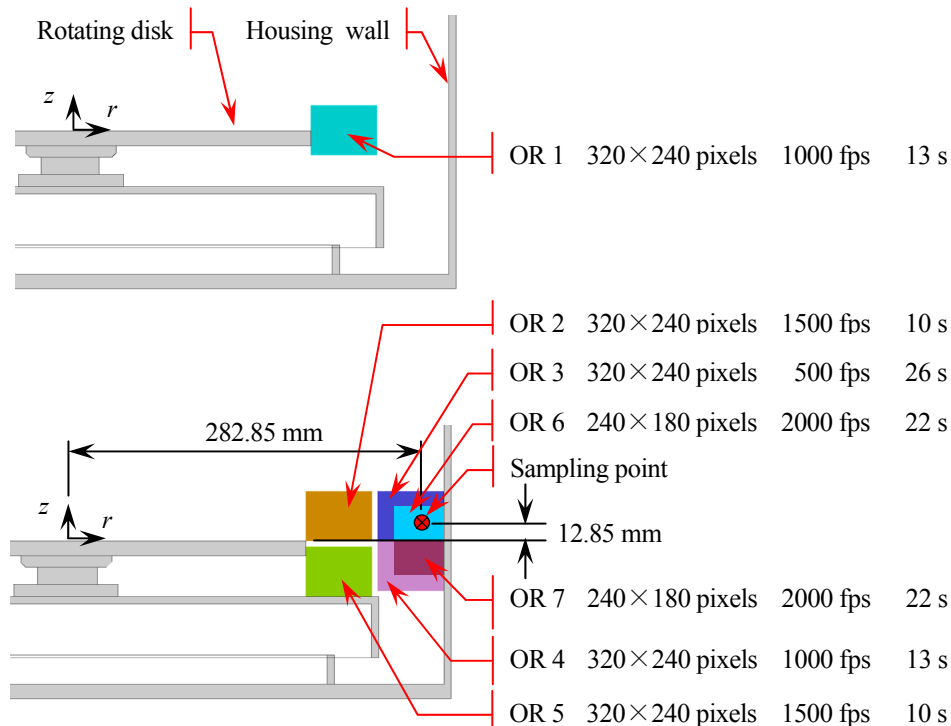


Fig. 5 PIV measurement regions.

3. 結果と考察

3・1 瞬時速度場

図6にダウンフロー流速 $U_a = 0.039$ m/s, 回転速度 $\omega d/2 = 3.46$ m/s における OR1, OR3, OR4 の典型的な瞬時速度場を示す。なお各画像の撮影時刻は同じではないことに注意されたい。また円盤は紙面奥から手前に向かって回転している。ベクトルは流れの向きを示しており、ベクトルの色は瞬時速度 $U = \sqrt{U_r^2 + U_z^2}$ を U_a で無次元化した値を示している。ここで U_r は半径方向速度, U_z は軸方向速度を示す。

OR1を見ると、反時計回りの大きな渦が円盤外周近傍で生じている。また回転数が高い場合には、OR3に示されるように円盤上面よりも高い位置において、外筒壁近傍でも大規模な逆流が時折発生することが分かった。この逆流は円盤の回転数が大きくなることで円盤上面より上方まで発達し、装置全域を覆う非常に大規模な循環流(荻野他, 1997)となり、パーティクルの再付着を引き起こしうると考えられる。この大規模な逆流はOR4に示される外筒壁に存在する反時計回りの渦が上下に振動した結果、生じたものと考えられる。また粒子の挙動を見ると、この外筒壁に存在する渦の振動は、OR1に示した円盤外周における渦の振動に呼応しているようである。

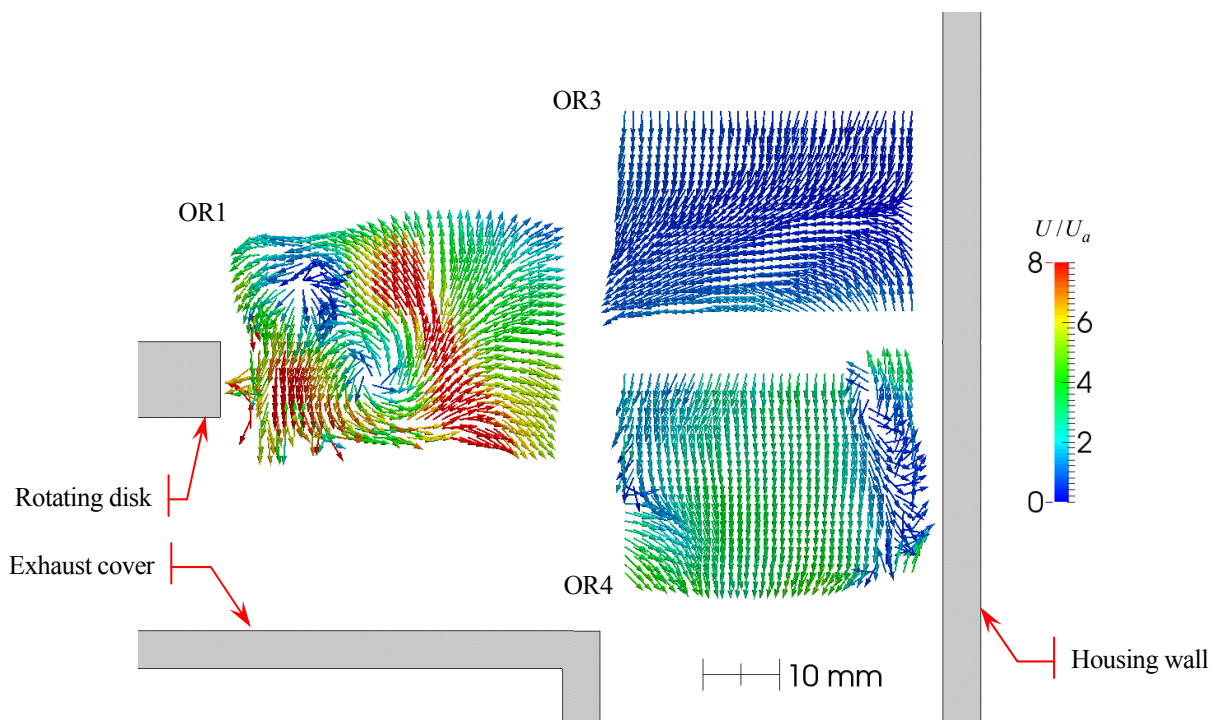


Fig. 6 Instantaneous velocity field at $U_a = 0.039$ m/s and $\omega d/2 = 3.46$ m/s. In OR1, large scale counterclockwise vortices appeared near the outer edge of the disk. In OR3 and OR4, recirculation flows appeared near the housing wall.

3・2 時間平均速度場

図7に $U_a = 0.039$ m/s における時間平均速度場を示す。時間平均には図5に示す各観察領域での撮影時間を全て使用している。また、図7(a)は $\omega d/2 = 0$ m/s, (b) は $\omega d/2 = 1.73$ m/s, (c) は $\omega d/2 = 3.46$ m/s, (d) は $\omega d/2 = 5.18$ m/s の結果を示している。図7(d)ではOR2とOR5の平均画像は表示していない。円盤速度が大きくなると円盤周辺の乱れが非常に大きくなる。そのためこの円盤速度では、図5に示す撮影時間では平均画像をつくるのに十分なデータ数ではないと判断したためである。ここで図のカラーコンタは時間平均速度 \bar{U} を U_a で無次元化した値で、2次元流線を重ねて表示してある。定常的には全ての場合において、円盤下面やや外側に時計回りの渦の存在が確認できる。なお瞬時速度場で見られた円盤下面からの反時計回りの渦は、この大規模な時計回りの渦の流れに乗って放出されたものである。また、図7(c)や(d)では外筒壁面上に反時計回りの渦が発生していることが分かる。

円盤下面の大規模な循環流は、円盤の回転により下面の空気が円盤外周から放出され、それがダウンフローと衝突し、下方へ流され、再度円盤下面と排気カバーの間に引き込まれることで発生している。排気カバー直上には円盤下面へ向かう流れと排気側へ流れる流れの岐点（図中○）が確認できる。円盤下面の渦は回転数の増加に伴い、円盤回転軸方向に引き寄せられる。OR3 と OR4 ではこの渦の移動に同調するように、ダウンフロー流が回転数の上昇に伴い徐々に回転軸側に寄る流れとなり、回転数があるしきい値をこえると、図 7 (c)の OR4 に示されるような反時計回りの渦が外筒壁上に形成され、さらに高回転になるとこの渦は発達し壁面に沿って上昇し、図 7 (d)の OR6 と OR7 に示されるように円盤上面より上部でかつ外筒壁面近傍では逆流が見られる。実験装置は円筒形であることから、この渦は周方向にわたって周期的に存在していると推測される。本計測では周期的な渦の 1 断面を時系列に観測していると考えられる。

このような回転数の増加に伴う円盤下面の渦の移動は、装置内全体の速度場に影響している。円盤が回転していない場合、図 7 (a)に示されるように外筒壁面付近では流速が速くなっている。回転数が増加するに伴い、図 7 (b)や(c)に示されるように、ダウンフロー流が円盤上面に吸い寄せられ、円盤外周から放出される空気流速が徐々に速くなる。それに伴い外筒壁面付近の流速は徐々に低下している。

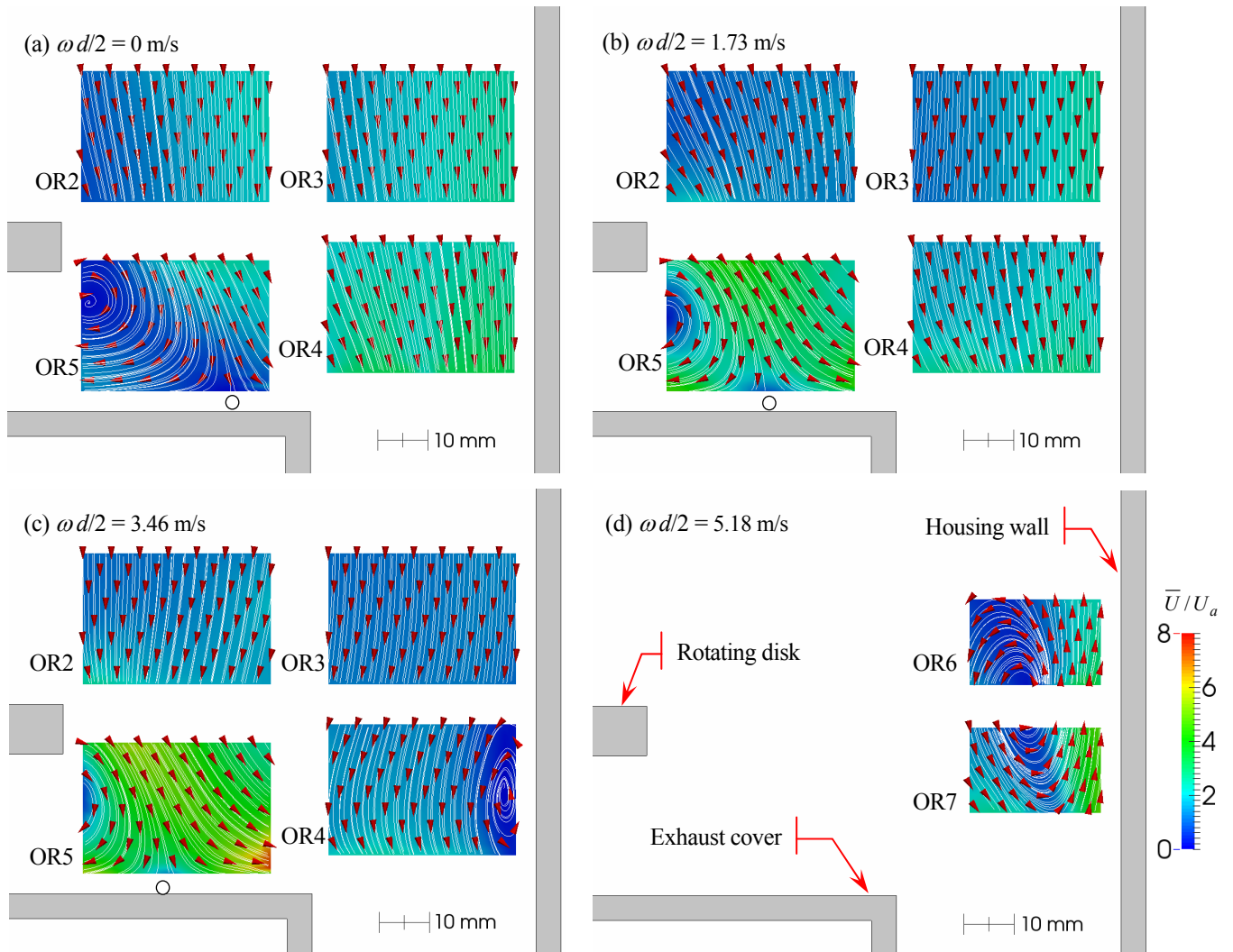


Fig. 7 Time averaged velocity field and stream lines for various $\omega d/2$ with $U_a = 0.039$ m/s. a) $\omega d/2 = 0$ m/s, b) $\omega d/2 = 1.73$ m/s, c) $\omega d/2 = 3.46$ m/s and d) $\omega d/2 = 5.18$ m/s. At $\omega d/2 \geq 3.46$ m/s, a recirculation flow appeared near the housing wall. This vortex moved upstream and its scale increased as the rotating speed increased. Note that ○ shows the stagnation point where the blown air down to the disk branches toward the axis of the rotating disk and the housing wall.

3・3 逆流の制御

図8に $U_a = 0.078 \text{ m/s}$, $\omega d/2 = 8.64 \text{ m/s}$ における OR3 内の外筒壁近傍のサンプリングポイント (図5参照) における回転軸方向速度成分 U_z の時系列データの典型例を示す. この位置で時間平均速度 $\overline{U_z}$ は -0.08 m/s となり, 平均的には下降流である. しかしながら, 速度は大きく変動しており, 瞬間的には逆流が発生していることが分かる. これは先に述べた OR4 の外筒壁面付近に生じる渦の上下の振動によるものである.

図9にこの位置での各回転数における $\overline{U_z}$ の変化を示す. $U_a = 0.039 \text{ m/s}$ の場合に注目すると, $\omega d/2 = 5.18 \text{ m/s}$ で $\overline{U_z}$ が負から正に転じている. これは逆流が存在する時間的割合が下降流のそれを上回ったことを示している. 図9より, ダウンフロー流速を増加すれば, より速い円盤の回転速度でも逆流の発生を抑制できることが分かる. $U_a = 0.24 \text{ m/s}$ では時間平均的には $\omega d/2 \sim 30 \text{ m/s}$ でも, 逆流は発生していない.

最後に, 図10に逆流が発生する円盤回転速度とダウンフロー流速の関係をまとめた. この図は, 図9で得られた各 U_a に対して, $\overline{U_z}$ がゼロとなる $\omega d/2$ の値をプロットしたもので, 赤色で示した領域で外筒壁面付近に逆流が生じる. 図より逆流が発生する回転速度とダウンフロー流速の関係はおよそ放物線となっていることが分かる. 層流の無限空間中に置かれた回転円盤が円盤上に吸い込む流量は回転速度の1/2乗に比例することがよく知られている (Schlichting, 1979). 逆流が発生する回転速度とダウンフロー流速の関係も同様であることから, 円盤が吸い込む空気流量と上流からダウンフローとして押し込む空気流量の釣り合いが崩れた時, 時間平均的には外筒に渦が生じるのではないかと類推される.

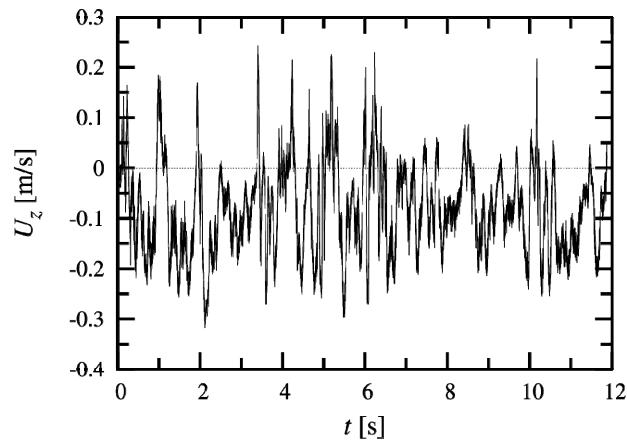


Fig. 8 Time history of U_z for $U_a = 0.078 \text{ m/s}$ and $\omega d/2 = 8.64 \text{ m/s}$. Though $\overline{U_z}$ is -0.08 , the recirculation flow of $U_z > 0$ occurs intermittently.

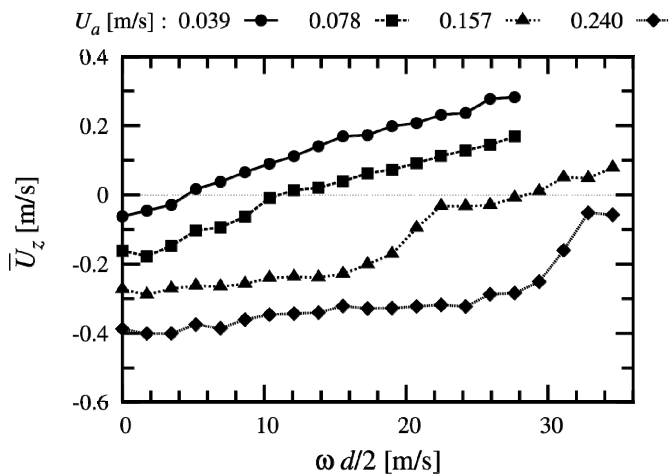


Fig. 9 $\overline{U_z}$ is plotted as a function of $\omega d/2$ for various U_a . This figure shows the tendency that the blown air down to the disk suppresses the recirculation flow due to the rotation of the disk.

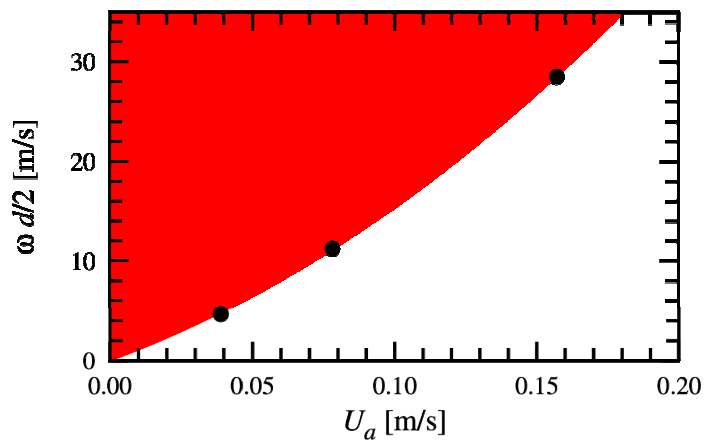


Fig. 10 $\omega d/2$ is plotted when $\overline{U_z}$ becomes zero in Fig.9 for three values of U_a . This figure indicates typical values of U_a to suppress the recirculation flow.

4. 結 言

半導体の洗浄に使用されている枚葉式洗浄装置を簡素化した実機と同じサイズの実験装置を作製し、装置内の渦構造を2次元PIVにより調べた。なお本研究では円盤の回転速度は0–34.56 m/s (回転数0–2000 rpm 相当)、ダウンフロー流速は0.039–0.24 m/s (流量0.5–3 m³/min 相当)である。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 円盤外周では、円盤上面と下面から互いに反対向きの渦が放出され、円盤外周周辺で互いに衝突することで比較的大規模な反時計回りの渦が形成される。この渦は円盤の回転速度の増加に伴い、上下に振動し円盤上面にせり出し、パーティクルの再付着を引き起こしうる。
- 2) 円盤の回転速度の増加に伴い、ダウンフロー流は円盤に集められるように流れ、それに伴い装置外筒壁面付近での流速が低下する。回転速度があるしきい値を超えると、時間平均的にも外筒内壁上に大きな反時計回りの渦が形成される。この外筒付近の渦は瞬間的には非常に大規模なものとなり、パーティクルの再付着を引き起こしうる。
- 3) 外筒壁面付近に形成される渦に伴う逆流と、それが発生する円盤回転速度とダウンフロー流速の関係を明らかにした。これにより各回転数において半導体の欠陥となり得るパーティクルの再付着を引き起こす恐れのある大規模な循環流を抑制するのに必要なダウンフロー流量を示すことができた。

文 献

- 流れの可視化学会編, 流れの可視化ハンドブック (1986), pp.57–59.
- 福田修也, 清水義也, 久米田高輝, 森洋平, 河内俊憲, 柳瀬眞一郎, 円筒容器内回転円盤付近流れの可視化, 日本機械学会 中国四国学生会 第43回学生員卒業研究発表講演会 (2013), Paper No.1020.
- 木村誠一, 宗像瑞恵, 田中勘輔, 栗島啓聡, 吉川浩行, 大庭英樹, スピンコーティングにおけるウェーハ上面境界層に及ぼすカップ形状と排気流れの影響, 日本機械学会年次大会講演論文集 No.2 (2006), pp.413–414.
- 森洋平, 清水義也, 後藤晋, 柳瀬眞一郎, 枚葉式シリコンウェーハ洗浄機モデル内流れの実験, 第9回日本流体力学会中四国・九州支部総会・講演会 (2012).
- 荻野文丸, 齊藤泰司, 松本初, 回転円板上淀み点流れの流動特性, 化学工学論文集 Vol.23, No.5 (1997), pp.713–719.
- Schlichting, H., Boundary layer theory, 7th ed., translated by J.Kestin (1979), pp.102–107, McGraw-Hill.
- Shimizu, Y., Goto, S. and Yanase, S., Flow around a rotating disk in a closed cavity as a model of the wafer cleaning chamber, The 7th International Conference on Flow Dynamics (2010), Paper No.1315.
- 可視化情報学会編, PIV ハンドブック (2002), pp.63–164.

References

- Flow Visualization Society of Japan ed., Handbook of flow visualization (1986), pp.57–59 (in Japanese).
- Fukuda, N., Shimizu, Y., Kumeda, T., Mori, Y., Kouchi, T. and Yanase, S., Visualization of the flow around a rotating disk in a cylindrical container, Proceedings of the 43th JSME Chugoku-Shikoku Conference for students (2013), Paper No.1020 (in Japanese).
- Kimura, S., Munekata, M., Tanaka, Z., Kurishima, H., Yoshikawa, H. and Ohba, H., A study on boundary layer flow over a wafer surface in spin coating system, Proceedings of the JSME annual meeting No.2 (2006), pp.413–414 (in Japanese).
- Mori, Y., Shimizu, Y., Goto, S. and Yanase, S., Experiments of flow in the single silicon wafer cleaning chamber, Proceedings of the 9th JSFM Chushikoku-Kyushu Conference (2012), (in Japanese).
- Ogino, F., Saito, Y. and Matsumoto, H., Flow near a rotating disc with stagnation flow, Kagaku kogaku ronbunshu Vol.23, No.5 (1997), pp.713–719 (in Japanese).
- Schlichting, H., Boundary layer theory, 7th ed., translated by J.Kestin (1979), pp.102–107, McGraw-Hill.
- Shimizu, Y., Goto, S. and Yanase, S., Flow around a rotating disk in a closed cavity as a model of the wafer cleaning chamber, The 7th International Conference on Flow Dynamics (2010), Paper No.1315.
- The Visualization Society of Japan ed., Handbook of particle image velocimetry (2002), pp.63–164 (in Japanese).