

マイクロフォンアレイを用いた  
枚葉式半導体洗浄装置内に形成される大規模渦構造の検出河内 俊憲<sup>\*1</sup>, 三好 勇輝<sup>\*2</sup>, 中野 裕介<sup>\*2</sup>, 永田 靖典<sup>\*1</sup>, 柳瀬 眞一郎<sup>\*3</sup>Large-scale vortical structure detection using microphone array  
in a semiconductor single wafer spin cleanerToshinori KOUCHI<sup>\*1</sup>, Yuki MIYOSHI<sup>\*2</sup>, Yusuke NAKANO<sup>\*2</sup>,Yasunori NAGATA<sup>\*1</sup> and Shinichiro YANASE<sup>\*3</sup><sup>\*1,\*2,\*3</sup>Mechanical and System Engineering of Okayama University

3-1-1 Tsushimanaka, Kita-ku, Okayama, Okayama 700-8530, Japan

Received 15 May 2015

## Abstract

Fluctuating pressure ( $p'$ ) of a large-scale vortical structure generated in a semiconductor single wafer spin cleaner was detected by using microphone array. Twelve microphones were installed on the exhaust cover under the rotating disk of the cleaner with their interval of  $7.5^\circ$  or  $15^\circ$ . Power spectrum densities (PSD) of  $p'$  were compared with those of fluctuating velocity measured by PIV for various rotation angular velocities to identify fluctuations due to convection of the large-scale vortical structure. Good agreement of PSDs indicates that the large-scale structure could be detected by using microphone. Cross-correlation of  $p'$  measured at different positions revealed that the large-scale structure convected to the downstream in the rotational direction of the disk. The convection speed was about 12 % of the angular velocity of the rotating disk. Number of the vortex in the large-scale structure was also evaluated from the time-series  $p'$  data. Time-space contour map was made for  $p'$  based on the data measured at the different angular position, and showed periodical swept strip patterns. Presences of the strip patterns indicate the pressure disturbances were stably convected to the downstream. From this time-space map, two-dimensional Fourier transform efficiently extracted the number of vortices in the large-scale structure.

**Key words** : Rotating disk, Flow stability, Coherent structure, Differential pressure measurement

## 1. はじめに

近年、集積回路の微細化に伴い、半導体製造における洗浄方式が、“バッチ式”から“枚葉式”に変更されつつある(服部, 2008)。枚葉式洗浄では、1枚毎にウェーハを超純水でリンスし、1000~2000 rpm程度の回転数でウェーハを高速回転させながら乾燥空気を装置上部から流し乾燥させる。以後この空気流のことを下降流と呼ぶ。この方式では乾燥時にウェーハを高速回転させるため、処理室内には様々な循環流(渦)が発生しうる。回転円板上の流れは古くから研究され、円板上の層流境界層が乱流に遷移する過程で螺旋状に縦渦が発生することが知られている(Schlichting, 1979)。またウェーハは密閉された処理室内に設置されている。このような密閉された容器中で円板を回転させた場合、ケーシング内に螺旋状の進行波が形成されることが知られている(Schouveiler et al., 1999; Gauthier et al., 1999)。またウェーハを回転させる円板の下には、下降流を均一に排気するためのカバー(排気カバー)が設置されている。このような2つの回転円板(一方が回転していない場合も含む)で挟まれた流体中に大規模な螺旋渦構造が生じることが知られている(Moisy et al., 2004)。洗浄機の形状や運転条件によっては、回転によって振り切られた超純水のみストや機械部からの微小パーティクルが、このような螺旋渦によって

No.16-00441 [DOI: 10.1299/transjsme.16-00441]

<sup>\*1</sup> 正員, 岡山大学大学院 自然科学研究 科機械システム工学専攻 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)<sup>\*2</sup> 学生員, 岡山大学大学院 自然科学研究科 機械システム工学専攻<sup>\*3</sup> 正員, フェロー, 岡山大学大学院 自然科学研究 科機械システム工学専攻

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

ウェーハに再付着しうる。

しかしながら、処理室内の渦構造の詳細はほとんど分かっておらず、洗浄機開発メーカーでは、処理室の形状や運転条件は設計者の経験により決められているのが現状である。最先端の半導体製造に用いられるウェーハでは、付着パーティクルを 20 nm で数十個、50 nm で数個以内におさえる必要がある。そのためには、単に洗浄機の洗浄能力を向上させるだけではなく、各運転条件において処理室内の気流状態を把握し、パーティクルの再付着を生じないよう適切な運転を行うことが重要となる。

我々のグループではこのような背景をうけ、数年前から洗浄装置内の 2 次元非定常 PIV (Particle Image Velocimetry) や 3 次元 LES (Large Eddy Simulation) 解析に取り組んでいる (清水他, 2014; 河内他, 2015)。その結果、運転条件によっては図 1 に示すような大規模な旋回渦が、洗浄装置内の円板端から容器外筒へ向かって安定なパターンを形成し、円板の回転方向にゆっくりと回転していることが分かった (河内他, 2015)。この大規模渦は、回転円板と排気カバー間の流体が遠心力により、装置の半径方向へ放出されるときに、下降流とぶつかり生じ、特定の断面で見た場合、断面内の渦が時間の経過に伴い回転円板の遠心力により装置半径方向、かつ下降流により排気カバーへ移流するように見える。なお洗浄機内に形成される大規模渦構造の詳細に関しては、河内他 (2015) を参照された。

この大規模構造に伴う巻き上がりの有無やその詳細を、様々な運転条件において把握出来れば、最適な運転条件を見出すことができる。また巻き上がりを引き起こす大規模渦構造を抑制できる洗浄機形状を考案できれば、洗浄行程の大幅な時間短縮も期待できる。しかしながら現状、PIV や LES を実機の開発に適用することは、時間やコストの面から困難である。洗浄装置はユーザ毎に設置できるスペース、乾燥空気流量や洗浄度の要求が異なり特注品となる。そのため仕様に合わせて都度、最適な形状や運転条件を模索する必要がある。PIV ではその実施に可視化モデルを作成する必要があるため、特注品の開発には適さない。また回転方向の速度成分とその他の方向の速度成分の速度差に起因した計測精度の問題 (河内他, 2015) から、円板回転数を上げた計測は難しく、複雑な形状への適用も困難である。他方 LES 解析では、その適用には実験データとの十分な比較・検証を行う必要がある。現状、検証用に得られたデータは特定の 2 次元平面内の速度データのみで十分とは言えない。特に大規模渦の 3 次元構造や移流速度に関しては検証用データがない (河内他, 2015)。

そこで本研究では、PIV 計測より組み込みが容易なマイクロフォンにより、大規模構造の移流速度やその個数の計測を試みた。渦の中心部では遠心力により圧力が低下する。そのため装置内を大規模渦が通過すると、速度と同様に圧力にも変動が生じると考えられる。そこでまず、マイクロフォンにより計測された圧力変動のパワースペクトルを、既存の PIV データのそれと比較し、大規模構造内の渦の通過に伴う変動が生じていることを確認する。そして円周方向に多数配置したマイクロフォンの信号の分布や相互相関係数から、渦の個数や移流速度を算出したので報告する。



Fig. 1 Snapshot of large-scale vortex structures observed in a modeled single spin cleaner. The vortical regions are identified with the second invariant of velocity gradient tensor over 200 for LES. The disk rotates in a clockwise direction in this figure (Kouchi, et al., 2015).

## 2. 実験方法

### 2・1 枚葉式洗浄装置モデル

図2に本研究で用いた洗浄装置モデルの概要を示す。図2aは装置全体の系統図、図2bは測定部の側面図、図2cは上面図である。測定部は処理室を模擬した直径  $D=520$  mm、高さ  $470$  mm の円筒からなっており、その中心に半径  $R_d=165$  mm の円板が置かれている。このモデルではシリコンウェハとそれを保持するチャックテーブルは1つのものとして簡素化し、厚さ  $10$  mm のアルミ製円板を用いている。円板下部には排気カバーが設けられ、その内側に3つの排気ポートがある。

円板に吹き付けられる空気流は送風機により装置内を循環する。送風機から送られた空気流はオリフィス流量計を通り、処理室の上方に設置された流路を通り、長さ  $1830$  mm の助走区間に流入する。助走区間入口には格子間隔  $26$  mm の整流用ハニカムが設けてあり、助走区間で気流の乱れが減衰される。測定部に流入した下降流は回転円板にぶつかり、排気カバーと処理室のすき間を通過してカバー内に入り、排気ポートから送風機へと戻る。本研究では円板上面の中心を原点とした円筒座標系  $(r, \theta, z)$  を用いる。なお洗浄装置モデルの詳細に関しては参考文献(河内他, 2015)を参照されたい。

実験は下降流量  $Q$  を  $1.0 \pm 0.1$  m<sup>3</sup>/min で固定し、円板回転数  $n$  を  $0 \sim 2000$  rpm で変化させて行った。これは測定部の断面平均流速  $U=0.078$  m/s、円板角速度  $\Omega=0 \sim 209$  rad/s に相当する。本研究では主に  $Q=1.0$  m<sup>3</sup>/min、 $n=1000$  rpm の結果を示す。この条件はそれぞれ円板の回転レイノルズ数  $R_R (= \Omega R_d^2/\nu) = 1.9 \times 10^5$ 、下降流レイノルズ数  $R_D (= UD/\nu) = 2.7 \times 10^3$  に相当する。なお  $\nu$  は空気の動粘性係数である。

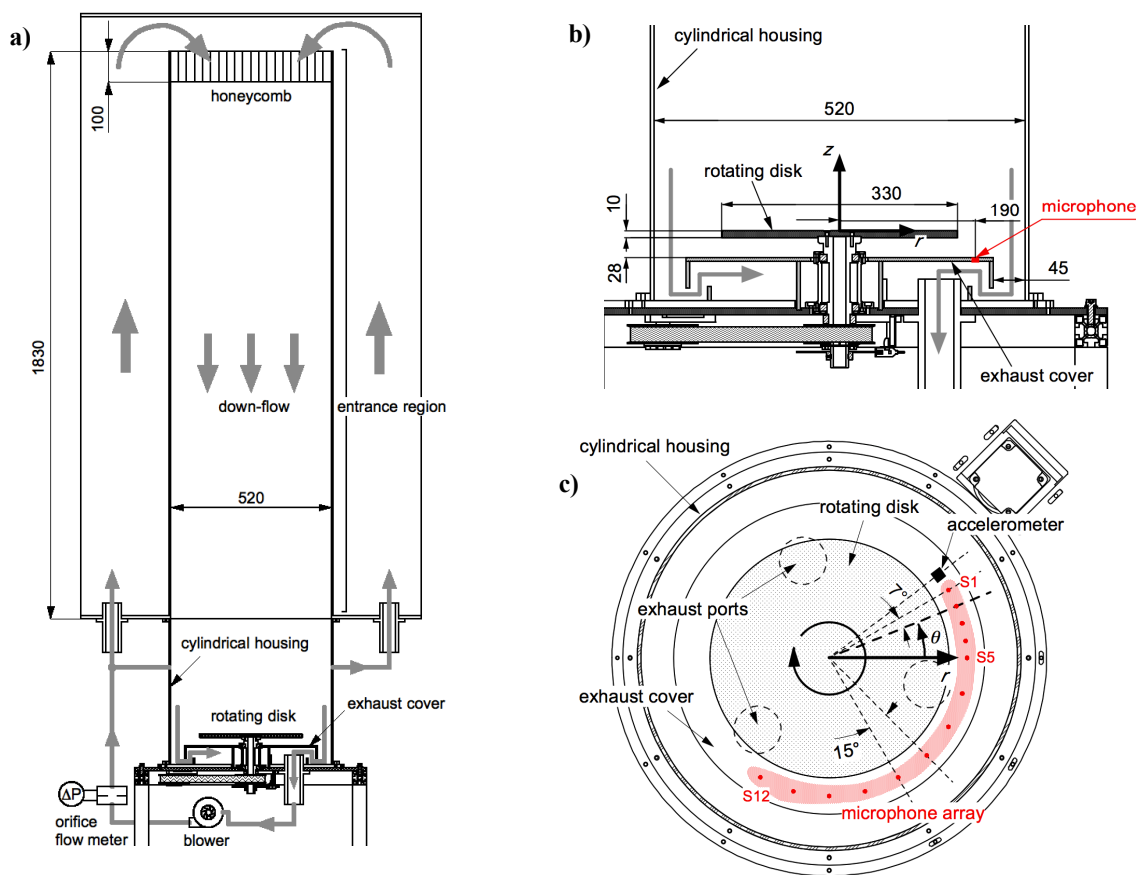


Fig. 2 Model of a single wafer spin cleaner used in this study. Fig. 2a shows the schematic diagram of the experimental apparatus. Arrows in this figure indicate flow direction. Fig. 2b shows the details near the rotating disk. Fig. 2c shows the top view of the model and the details on the installation of microphones.

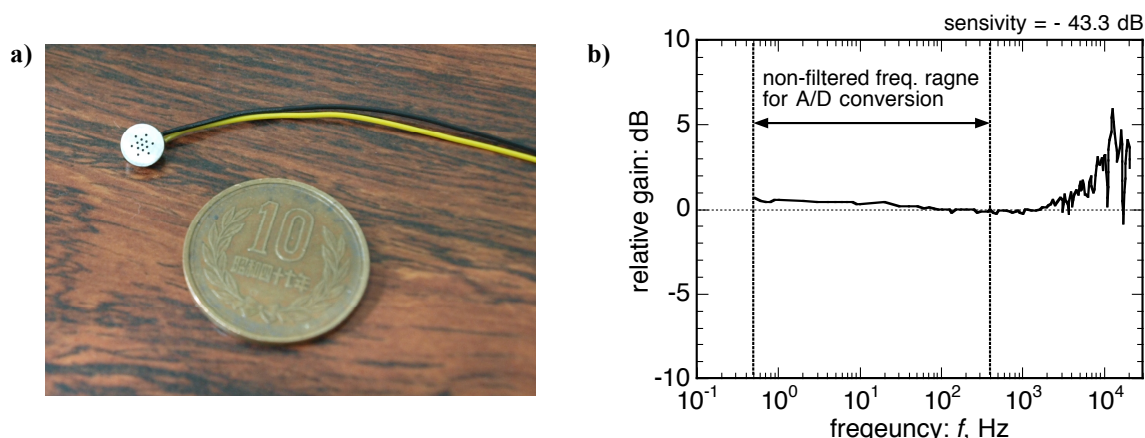


Fig. 3 Electret condenser microphone used in this study and its typical frequency response. This microphone had flat response from 0.5 Hz to 1 kHz. Its sensitivity was 6.8 mV/Pa (-43.3 dBV/Pa).

## 2・2 微小圧力変動の計測

変動圧力の計測には図3に示すエレクトレットコンデンサーマイクロフォン (Primo 製 EM246) を用いた。このマイクロフォンの感度は 100 Hz において 6.8 mV/Pa (-43.3 ± 0.8 dBV/Pa) で、図 3b に示すように 0.5 Hz-1 kHz で平坦な周波数応答特性を持ち、低周波の計測に適している。

マイクロフォンの設置位置は、以前行った PIV と LES の結果(河内他, 2015)と予備実験をもとに決定した。PIV と LES の結果によると、大規模構造は回転円板端から外筒壁に向う複数の螺旋渦により形成され、下降流により排気カバーにぶつかっていた。この螺旋渦を検出しやすいようにマイクロフォンは排気カバー上に設置した。設置位置は図 2b に示されるように円板と排気カバー端のちょうど中間  $r = 190$  mm とし、円周方向に 12 個設置した。センサの設置角度  $\alpha$  は S1 から S5 まだが 7.5°, S5 から S12 まだが 15°となっている (図 2c 参照)。また LES の結果から、圧力変動は微小で  $n \leq 500$  rpm では  $\pm 1$  Pa 以下となることが予想された。そのため極微小な圧力変動の計測が可能なマイクロフォンを用いた。

マイクロフォンは感度が非常に高く極微小な圧力変動を計測できる一方、装置の微小な振動も出力として拾ってしまう。洗浄装置の場合、円板の回転に起因した固有振動が生じ、それが渦の周期と区別できないことが懸念された。そこで装置の振動と渦の通過に伴う圧力変動とを区別するため、本研究ではマイクロフォンとは別に排気カバー裏側に加速度計を設置した (図 2c 参照)。機械の回転固有振動以外にも、循環路内に発生した乱れが下降流を通じて変動圧力計測に影響を及ぼすことが考えられる。しかしながら本実験の場合、循環路内に発生した乱れは整流ハニカムと助走区間により十分減衰され、計測に影響しないことを、円板の回転なし・下降流のみの計測と背景ノイズに相当する回転なし・下降流なしの結果から確認している。なおマイクロフォンの出力は、カットオフ周波数 0.5 Hz のハイパスフィルターと 400 Hz のローパスフィルタをかけた上で、サンプリング周波数 5 kHz で 5 分間取得した。

図 4 に  $\Omega = 104.7$  rad/s ( $n = 1000$  rpm) における圧力変動  $p'$  の時間履歴を示す。図 4 の上のグラフが S3, 中央が S4, 下が S5 における履歴で、S3 が回転方向における上流側にあたる。図より、圧力変動の振幅は  $n = 1000$  rpm でも  $\pm 3$  Pa 以下と非常に小さいことが分かる。また図中の破線で示したように、いくつかのピークは明瞭に下流に移流している。

このようにして得られた時系列データからパワースペクトル (PSD) を FFT により計算した。PSD を計算する際は、スペクトルノイズを低減するため、計測した全 300 s のデータをデータの 50% をオーバーラップさせながら 10 s 間隔に分割し、各データに対して PSD を算出し加算平均した。図 5 にその結果を示す。上のグラフはマイクロフォンの信号の、下のグラフは加速度計の信号の PSD である。加速度計の PSD を見ると、 $f = 17, 47, 100$  Hz に明瞭なスパイクが見られる。これは装置の振動に起因するものである。この周波数のスパイクはマイクロフォンの PSD にもスパイクとして現れている。従って、この急峻なスパイクは装置の振動に起因するもので、圧力変動に起因するものではないと判断できる。このスパイクを除いてみた場合、マイクロフォンの PSD は 10 Hz から増加し、20 Hz 以降緩やかに減少している。この  $f = 10 \sim 60$  Hz における緩やかなスペクトルのバンプ中に、機械振



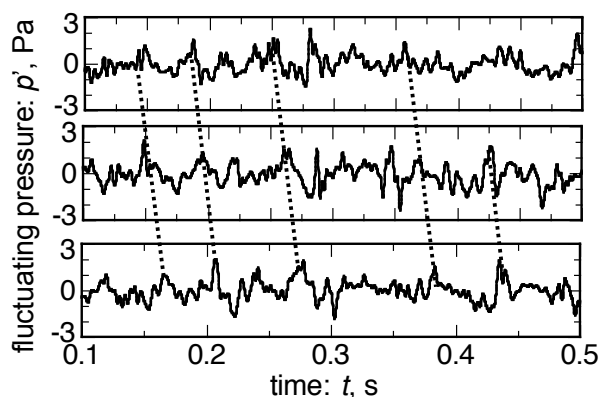


Fig. 4 Typical time history of fluctuating pressure ( $p'$ ) at S3 (upper), S4 (middle) and S5 (lower) at  $\Omega = 104.7 \text{ s}^{-1}$ . Downstream  $p'$  had a certain time lag for upstream one. Note that the range of  $p'$  is  $\pm 3 \text{ Pa}$ .

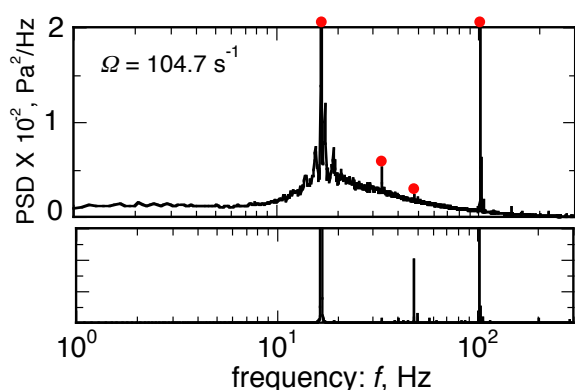


Fig. 5 Power spectral density of both  $p'$  (upper) and the signal of accelerometer (lower) at  $\Omega = 104.7 \text{ s}^{-1}$ . Line spectra are observed in PSD of the accelerometer signal owing to the vibration of the model. These peaks are also observed in PSD of  $p'$ .

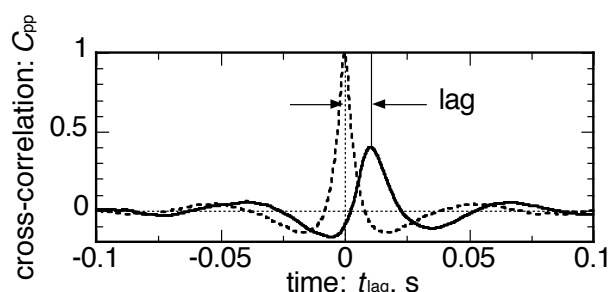


Fig. 6 Auto-correlation of  $p'$  at S4 (dashed lines) and cross-correlation of  $p'$  between at S4 and S5 (solid line). The peak in the cross-correlation is observed at lag of  $\sim 0.01 \text{ s}$ .

動とは異なるスペクトルのピークがおよそ 18 Hz を中心として 3~4 個存在している。この複数のピークは後述するように渦の通過に起因するものである。

得られた時系列データには図 4 に示すように、センサ位置の違いに伴う位相遅れが見られる。そこでこの位相遅れを相互相関により定量化した。図 6 にその結果を示す。図 6 には S4 のセンサを基準とした自己相関 (破線) と S5 との相互相関 (実線) を示してある。なお相関係数を算出する際は、PSD 同様、データを分割し平均化した。相関係数を求める際のデータ長は、スペクトルの場合より長く 60 s とした。また図 5 で見られた装置の振動に起因する周波数成分にはセンサ間で位相遅れがないため、フィルタ処理により除いた上で相関係数を算出している。図より S5 の位置の圧力変動は、S4 よりおよそ 0.01 s 進んでいることが分かる。

### 3. 結果と考察

#### 3・1 大規模渦の検出

本研究の目的の一つは、マイクロフォンにより、洗浄機内の大規模渦構造を検出できるかどうかである。これを検証するため、大規模構造に起因した変動が特定できている PIV の結果 (河内他, 2015) とマイクロフォンの結果を比較した (図 7)。図の横軸は周波数  $f$ 、縦軸は PSD で、 $\Omega = 10.5 \sim 104.7 \text{ rad/s}$  の比較を示してある。なお実線はマイクロフォン、破線は PIV の結果である。PIV ではカメラのメモリの制限から計測時間がマイクロフォンの計測ほど長く取れなかった。そのため PIV の周波数分解能は 1 Hz と、マイクロフォンに比べて 10 倍大きい。

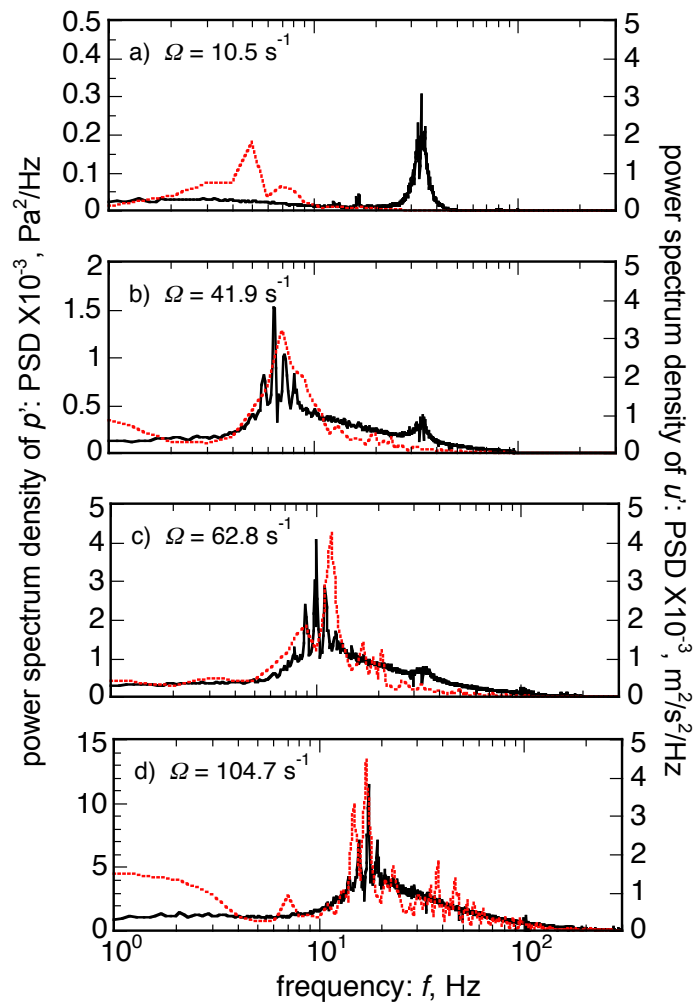


Fig. 7 Power spectral density function of  $p'$  (black lines), compared with those of  $u_z'$  measured by PIV (red lines), for various  $\Omega$  cases. Multi-spectral peaks are observed in each  $\Omega$  case. The frequencies where the multi-peaks are observed increased with increasing  $\Omega$ .

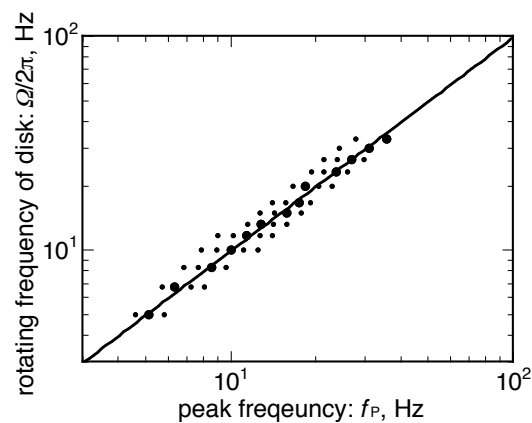


Fig. 8 The frequency of  $p'$  caused by large-scale vortical structures (spectral peak frequency) are summarized for rotating frequency of the disk. The spectral peak frequency linearly correlated to the rotating frequency of the disk.

PIVの結果を見ると、例えば  $\Omega = 41.9$  rad/s では 6 Hz にピークが見られる。このピークは円板の角速度が増加すると、より高い周波数にシフトする（例えば  $\Omega = 104.7$  rad/s では 16 Hz）。この  $\Omega$  の増加に比例して検出周波数が増加するピークが、大規模構造を形成する渦の通過に起因する速度変動である（河内他, 2015）。

この PIV とマイクロフォンの結果を比較すると、 $\Omega = 10.5$  rad/s を除いてスペクトルの形状は良好な一致を示している。従って、マイクロフォンにより計測された圧力変動にも渦の通過に起因する変動が“顕著”に含まれていることが分かる。PIV とマイクロフォンの PSD の特徴的な違いは、PIV では明瞭なピークがおおよそ 1 つしか見えないのに対して、マイクロフォンの結果では渦に起因する変動の周波数域に複数のピークが見られる点である。これは周波数分解能の違いに起因するもので、PIV においても渦に起因した変動周波数が増加する  $\Omega = 104.7$  rad/s では、複数の連なったピークが見られる。このように複数のピークが存在する現象は、渦の個数が時間的に変化していることに依るもので、以前行った LES 計算にも見られた。

図 7b-7d に見られるように  $\Omega \geq 41.9$  rad/s では、マイクロフォンの結果と PIV の結果が一致している。それに対して、 $\Omega = 10.5$  rad/s では PSD の形状が大きく異なっている。マイクロフォンでは特徴的なピークが  $f \sim 33$  Hz に現れている。この周波数の変動は、その他の角速度条件（ $\Omega = 41.9, 62.8$  rad/s）でも、スペクトルバンプのスロープに若干埋もれているが見られる。この  $f \sim 33$  Hz に見られるスペクトルの山は、下降流量を変化させた実験から、下降流に起因した変動であることが分かっている。しかしながら、この下降流による変動を除いても、 $\Omega = 10.5$  rad/s のマイクロフォンのデータでは、PIV と異なり低周波域に特徴的なピークが見られない。これは大規模構造が排気カバーに届いていないことが原因ではないかと考えているが、現在のところ明確な理由は分かっていない。

図 7b-7d に見られる大規模渦の通過に起因する変動周波数を図 8 に整理した。図の横軸は大規模渦に起因する変動周波数  $f_p$  で、縦軸は円板の回転周波数（ $f_d = \Omega/2\pi$ ）である。同一の  $f_d$  に対して複数のプロット点があるのは、大規模渦に起因する変動のピークが複数個存在するためである（図 7 参照）。なお図中の大きなシンボルは、変動強度が最大の周波数を意味している。図より明らかなように、大規模渦の通過に起因する変動周波数は、回転円板の回転周波数に比例して増加している。

$$f_p = f_d (= \Omega/2\pi) \quad (1)$$

以上の結果から、マイクロフォンによる微小圧力変動の計測により、枚葉式洗浄装置内に形成される大規模渦構造が検出可能であることが分かった。そこで次に、これまで PIV では計測が困難であった大規模構造の円周方向の特性（移流速度や渦の個数）に着目する。

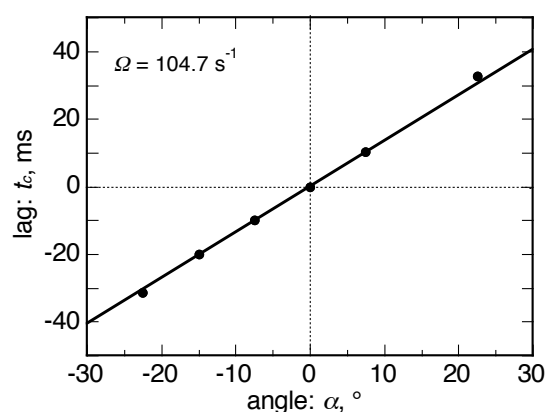


Fig. 9 Time lag evaluated by cross-correlation between  $p'$  measured at S4 and those at S1-S6. The time lag was proportional to the angle position of the microphone. Phase velocity of  $p'$  could be evaluated from the slope of this line.

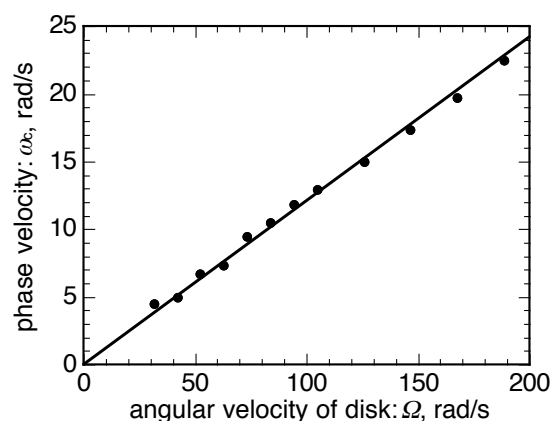


Fig. 10 Phase velocity of  $p'$  induced by the convection of the large-scale structure. This phase velocity of  $p'$  corresponds to the convection velocity of the vortices in the large-scale structure. The convection velocity is proportional to the angular velocity of the disk, but its magnitude was about 0.12-fold to that of the angular velocity of the disk.

### 3・2 大規模渦の移流速度

図7で見たように、マイクロフォンにより計測された $p'$ は大規模構造の通過に伴い特定の周期で振動している。なおかつ、この $p'$ は、図4や図6で見たように、あるタイムラグを持って、円板の回転方向に移流している。本実験では円周方向に12個のマイクロフォンが設置されており、センサ間の信号のタイムラグを相互相関により見積もることができる。従って、センサの配置角をこのラグで割ることにより、大規模構造の移流角速度が算出できる。図9に $\Omega = 104.7 \text{ rad/s}$ におけるS4を基準とし、S1からS6まで信号のラグを求めた結果を示す。図の横軸はセンサの配置角で、縦軸はラグである。図より明らかなように、ラグは基準点周りで配置角に比例している。このようにして得られた図の傾きを求めることで、圧力変動の円周方向への位相速度、つまり大規模構造の移流速度 $U_c$ を求めた。図10に得られた大規模構造の移流速度をまとめた。図の横軸は $\Omega$ 、縦軸は $U_c$ である。図より明らかなように、 $U_c$ は $\Omega$ の増加に比例して増加している。しかしながら、その値は $\Omega$ より遥かに小さく、およそ $\Omega$ の12%程度となっていることが分かった。

### 3・3 大規模構造を形成する渦の個数

これまでは主に、圧力変動の周期やその円周方向への伝播といった時間に関する情報に着目してきた。ここでは同一時刻における円周方向に配置されたマイクロフォンの信号に着目し、大規模構造を形成する渦の個数の算出を試みる。図11に $\Omega = 104.7 \text{ rad/s}$ における各マイクロフォンで得られた時系列 $p'$ を、横軸を時間 $t$ 、縦軸をS1からの周方向距離 $s (= 2\pi R_s \alpha / 360)$ でコンターマップ化した時空間( $s$ - $t$ 線図)マップを示す。なお $R_s$ はセンサが配置された円の半径である。図のカラーは変動圧力の大きさを示しており、赤が圧力の高い領域、青が低い領域を示している。なお上図は、生データから作成した時空間マップで、下図は大規模構造の移流に起因する変動周波数域のみを通過するバンドパスフィルタ、例えば、 $\Omega = 104.7 \text{ rad/s}$ では10 - 30 Hz帯域を透過するフィルタ(図7d参照)を圧力変動の時系列データにかけてから作成した時空間マップである。この図では狭帯域のフィルター操作により圧力変動の振幅が若干小さくなったため、コンターレンジを $\pm 3 \text{ Pa}$ から $\pm 2 \text{ Pa}$ に変更していることに注意されたい。なおセンサの配置角がS1からS5までとS5からS12までで異なるけれども、これは間隔の広いS5-S12までのデータを間隔の狭いS1-S5までのデータに合わせて線形内挿することで対応した。

図11上のコンターマップを見ると、若干分かり難いが、青と赤の右上に走る縞模様が見える。これはフィルタ処理を施した下図ではかなり明瞭で、圧力変動が下流に移流していることを意味している。しかしながら、その伝播速度は縞模様の傾きが変化していることから、絶えず一定ではない。また圧力変動の縞模様は場所によって分岐や合流をしており、大規模構造を形成する渦が合体や分裂をしていることが分かる。

大規模構造を形成する渦の個数は、圧力変動の縞模様の本数を、周長に渡って数えればよい。しかしながら、図11で見たように渦の個数は時間的、空間的に変動しているため、手作業でその数を数えることは現実的でない。本研究では、図11に示す $s$ - $t$ 線図に二次元フーリエ変換を適用して、渦の個数を算出した。図11のような縞模様の模様を持った画像に対して、二次元フーリエ変換を行いパワースペクトルを算出すると、波数空間上に縞模様の傾きとその間隔によって、パワーの高い領域が現れる(Kouchi and Masuya, 2016)。図11のような $s$ - $t$ 線図の場合は、横軸が周波数 $f$ 、縦軸が波数 $k$ の $k$ - $f$ 線図が得られる。パワーの高い領域は、縞模様の傾きに直交した方向に、かつ縞模様の間隔が狭いほど $k$ - $f$ 線図の原点(波数直流成分位置)から離れた位置に現れる。

図12に図11の生データに二次元フーリエ変換を適用し得られた二次元パワースペクトル分布を示す。図の横軸は $f$ 、縦軸は無次元波数 $kR_s$ である。なお無次元波数 $kR_s$ は以下に説明するように大規模構造を形成する渦の個数 $N$ に相当する。今、半径 $R_s$ の円の周方向に波長 $\lambda$ の波が周期的に並んでいるとすると、この波の波数は $k = 2\pi/\lambda$ となる。これが二次元フーリエ変換で得られる縦軸に相当する。半径 $R_s$ の円周は $2\pi R_s$ なので、この周長に入る波の個数 $N$ は

$$N = 2\pi R_s / \lambda = kR_s \quad (2)$$

となり、波数にセンサ設置半径をかければ大規模構造を構成する渦の個数が得られる。なお二次元パワースペクトルの算出に際しては、時間方向のデータは一次元のパワースペクトル同様、10 s間隔のデータに分割し、加算平均をとっている。他方、縦軸に関してはデータ点数が少ないため分割・平均処理は行っていない。なおマイク



ロフォン S1 と S12 の開き角は  $135^\circ$  なので、波数分解能は  $14.0 \text{ m}^{-1}$ 、(渦の個数分解能にして 2.7) と若干粗いことに注意されたい。

図 12 を見ると  $k$ - $f$  線図上の第 2, 4 象限に振幅の高い領域が現れている。この高い振幅領域が図 11 で見た右斜め上に走る縞模様、つまり大規模構造の移流に伴う圧力変動に対応している。振幅の高い周波数を調べると、 $N=8.0$  では  $14 \text{ Hz}$ 、 $N=10.7$  では  $17.5 \text{ Hz}$  となっており、図 7d の PSD の特徴的なピークと合致している。これら 2 つの振幅の高い領域は原点からおおよそ同じ傾きの直線上にあることから、同一の移流速度で移流していることが分かる (Kouchi and Masuya, 2016)。従って、この回転数では 8 個から 10 個の渦が、同一の移流速度で周方向に移流していると結論付けられる。

他方で第 1, 3 象限にも比較的パワーの高い領域が存在している。これは  $s$ - $t$  線図上で左上から右下に走る縞模様を意味しており、物理的には回転方向の上流側に移流する圧力波を意味している。この第 1, 3 の比較的パワーの

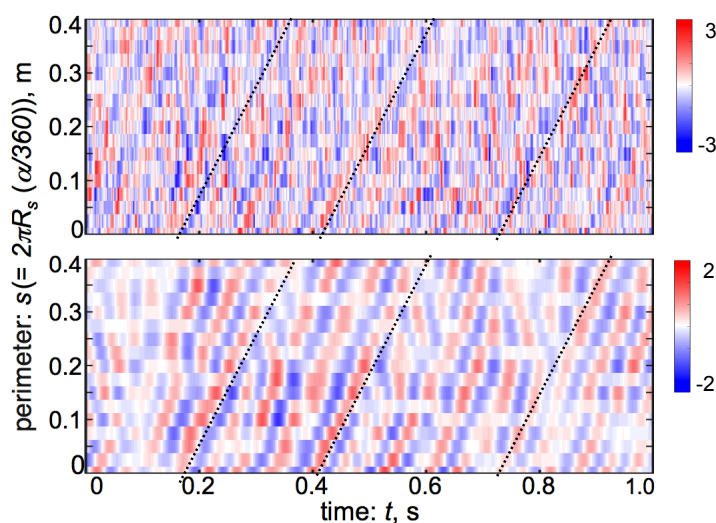


Fig. 11 Time-space trajectory of  $p'$ . The upper figure was constructed from raw  $p'$ , and the lower figure was from band-pass filtered  $p'$ . These figures clearly show the periodical strip pattern running from lower left corner to upper right corner (dashed lines). This periodical pattern indicates the pressure disturbance stably propagated to the downstream.

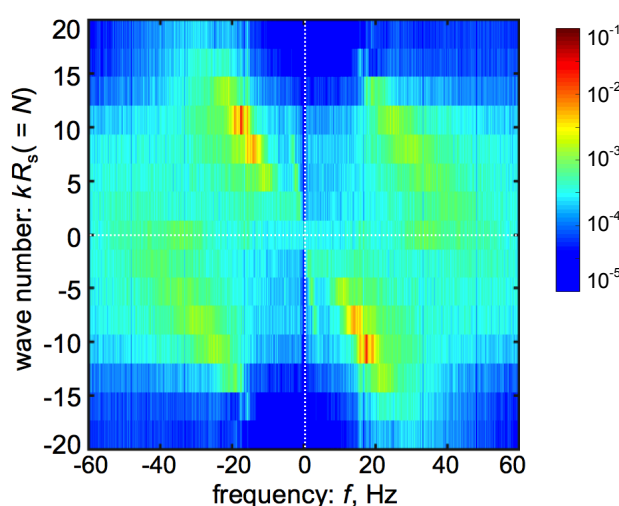


Fig. 12 Frequency-wave number spectrum of  $p'$ . High power regions appear at  $N = 8-10$  and  $f = 14-18 \text{ Hz}$  in the second and fourth quadrant. These peaks correspond to the strip patterns running from lower left corner to upper right corner in Fig. 11.

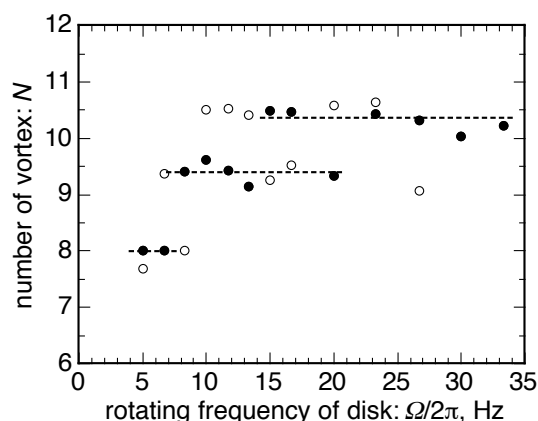


Fig. 13 Number of vortices in the large-scale structure for various  $\Omega$ . The number of vortices increased with increasing the rotating frequency of the disk.

高い領域は、原点からの傾きが同一の直線上に並んでいない。このことから、この上流に遡る圧力波は、大規模構造の移流に起因する圧力変動とは異なり、波長が異なるとその伝播速度が異なる。今のところ、この上流へ遡る圧力波が何を意味しているのかその物理的な意味や機構は分かっていない。

最後にこのようにして得られた大規模構造を形成する渦の個数を、図 13 に円板の回転数でまとめた。図の横軸は  $f_d$  で、縦軸は  $N$  である。図中黒色のシンボルは  $k$ - $f$  線図上で最大パワーとなる変動から推定した渦の個数、白抜きシンボルは 2 番目に高いパワーから推定した渦の個数である。なお渦の個数を二次元パワースペクトルから求める際は、PIV における粒子の移動量のサブピクセル推定と同様の手法 (Westerweel, 1997) で、その精度を高めた。

図より、大規模構造を形成している渦はおおよそ 8 個から 10 個であることが分かる。またこれは円板の回転数が増加するのに応じて 8 個から 10 個に増加する。実験値が非整数値となっているのは、渦の個数が時間的、空間的に変動していること (図 11 参照)、また計測の個数分解がそれほど高くないことに起因している。

このように本研究を通じて、実機でも組み込みが比較的容易なマイクロフォンを用いた圧力変動の計測により、洗浄機内に形成される大規模渦構造を検出できることが分かった。マイクロフォンは小さく複雑形状への適用も容易で、薬液対策が取れば、実機におけるインプロセス渦検出も可能となろう。また PIV 計測では得ることが困難であった、回転周方向の情報 (例えば大規模構造の移流速度や渦の個数等) をマイクロフォンを多点に配置することでかなり容易に得られるようになった。これらデータは今後、数値計算の検証に役立てることができる。将来的には数値計算により洗浄装置の最適形状を探索できるようになることが期待される。

#### 4. まとめ

本研究では枚葉式シリコンウェーハ洗浄装置内に、比較的設置が容易なマイクロフォンを多点に配置し、洗浄機内に形成される大規模渦構造が検出可能か、また PIV 等では計測が困難な大規模構造の移流速度や、それを形成する渦の個数の算出が可能かどうかを検証した。洗浄装置に供給する空気流量は  $Q = 1 \text{ m}^3/\text{min}$ 、円板回転数は  $n = 0 \sim 2000 \text{ rpm}$  で、マイクロフォンは排気カバー上に  $7.5^\circ$  の配置角で 5 個、 $15^\circ$  の配置角で 7 個、同一円周上に設置した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 大規模構造に起因した変動周波数が特定できている速度変動のパワースペクトルと、マイクロフォンにより計測された圧力変動のパワースペクトルを比較した。その結果、両者のスペクトル形状は良好な一致を示しており、マイクロフォン計測により大規模渦構造を十分捕らえられることが分かった。マイクロフォン計測の特徴として、PIV に比べて容易に計測時間を伸ばすことができ、結果として、渦の個数の変化に伴う変動周波数の変化をより詳細に捕らえることが可能であった。
- (2) マイクロフォンの信号は大規模構造の通過に伴い特定の周期で振動し、センサ位置に応じた位相遅れを持っていた。この位相遅れは大規模構造の円周方向への移流に起因するもので、センサ間の信号の位相遅れを相

互相關により算出し、大規模構造の移流速度を算出した。その結果、大規模構造の移流速度は円板の回転角速度  $\Omega$  の増加に比例して増加すること、またその値は  $\Omega$  のおよそ 12%であることが分かった。

- (3) 円周方向に多点に配置されたマイクロフォンの信号を元に、圧力変動の時空間マップを作成した。時空間マップ上の模様は特徴的な縞模様をしており、大規模構造内の渦の通過に起因する圧力変動が円板回転方向に移流していること、またその移流速度が時間的・空間的に変動していることや渦が下流に移流する際、合体と分裂を起こしていることが分かった。
- (4) この圧力変動の時空間マップに二次元フーリエ変換を適用し、大規模構造を形成している渦の個数を算出した。その結果、大規模構造はおよそ 8 個から 10 個の渦で形成されており、円板の回転数が増加すると渦の個数が増える傾向にあることが分かった。

## 謝 辞

本研究の一部は、岡山県の文部科学省補助事業「特別電源所在県科学技術振興事業」により実施した。また実験の実施に関してアプリシアテクノロジーの清水義也博士に様々な助言を頂きました。ここに謝意を表す。

## 文 献

- Gauthier, G., Gondret, P. and Rabaud, M., Axisymmetric propagating vortices in the flow between a stationary and a rotating disk enclosed by a cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.386 (1999), pp.105–126.
- 服部毅, 先端半導体洗浄技術の課題と展望, *表面技術*, Vol.59, No.8 (2008), pp.526-532.
- 河内俊憲, 福田修也, 中野裕介, 清水義也, 永田靖典, 柳瀬眞一郎, 枚葉式半導体洗浄装置内に形成される渦の周期構造, *日本機械学会論文集*, Vol.81, No.829 (2015), DOI: 10.1299/transjsme.15-00273.
- Kouchi, T. and Masuya, G., Quantification of convection velocity and dominant scale of large-scale structures by high-speed schlieren imaging, *AIAA 2012-4148* (2012), DOI: 10.2514/6.2012-4148
- Moisy, F., Doare, O., Pasutto, T., Daube O. and Rabaud, M., Experimental and numerical study of the shear layer instability between two counter-rotating disk, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.507 (2004), DOI:10.1017/S00221120 04008833.
- Schlichting, H., *Boundary layer theory*, 7th ed., translated by Kestin, J. (1979), pp.102–107, McGraw-Hill.
- Schouveiler, L., Gal, L.P., Chauve, M.P. and Takeda, Y., Spiral and circular waves in the flow between a rotating and a stationary disk, *Experiments in Fluid*, Vol.26 (1999), DOI:10.1007/s003480050278.
- 清水義也, 柳瀬眞一郎, 河内俊憲, 森洋平, 福田修也, 枚葉式半導体洗浄機モデル内渦構造の PIV 計測, *日本機械学会論文集*, Vol.80, No.815 (2014), DOI:10.1299/transjsme.2014fe0197.
- Westerwell, J., *Fundamentals of digital particle image velocimetry*, *Measurement Science and Technology*, Vol.8 (1997), pp. 1379–1392, DOI: 10.1088/0957-0233/8/12/002

## References

- Gauthier, G., Gondret, P. and Rabaud, M., Axisymmetric propagating vortices in the flow between a stationary and a rotating disk enclosed by a cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.386 (1999), pp.105–126.
- Hattori, T., Problems and perspectives in leading-edge semiconductor wafer cleaning technology, *Journal of The Surface Finishing Society of Japan*, Vol.59, No.8 (2008), pp.526-532 (in Japanese).
- Kouchi, T., Fukuda, N., Nakano, Y., Shimizu, Y., Nagata, Y. and Yanase, S., Periodical structure of vortices in a semiconductor single wafer spin cleaner, *Transactions of the JSME*, Vol.81, No.829 (2015), DOI: 10.1299/transjsme.15-00273. (in Japanese)
- Kouchi, T. and Masuya, G., Quantification of convection velocity and dominant scale of large-scale structures by high-speed schlieren imaging, *AIAA 2012-4148* (2012), DOI: 10.2514/6.2012-4148
- Moisy, F., Doare, O., Pasutto, T., Daube, O. and Rabaud, M., Experimental and numerical study of the shear layer instability between two counter-rotating disk, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.507 (2004), DOI:10.1017/S002211200 4008833.
- Schlichting, H., *Boundary layer theory*, 7th ed., translated by Kestin, J. (1979), pp.102–107, McGraw-Hill.
- Schouveiler, L., Gal, L.P., Chauve, M.P. and Takeda, Y., Spiral and circular waves in the flow between a rotating and a

Kouchi, et al, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.00, No.00 (2016)

stationary disk, Experiments in Fluid, Vol.26 (1999), DOI:10.1007/s003480050278.

Shimizu, Y., Yanase, S., Kouchi, T., Mori, Y. and Fukuda, N., PIV Measurement of vortical structures in a model of semiconductor single wafer cleaner, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.80, No.815 (2014), DOI:10.1299/transjsme.2014fe0197.

Westerwell, J., Fundamentals of digital particle image velocimetry, Measurement Science and Technology Vol.8 (1997), pp. 1379–1392, DOI: 10.1088/0957-0233/8/12/002