

(様式第27)

06A30701d

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
平成18年度産業技術研究助成事業  
研究成果報告書

水蒸気と水の混合噴流による  
低環境負荷洗浄装置の開発

平成19年11月

国立大学法人 静岡大学

真田 俊之

(様式第28)

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
産業技術研究助成事業 研究成果報告書概要 (平成18年度)

作成年月日	平成19年11月29日
プロジェクトID	06A30701d
助成研究者の機関名	国立大学法人 静岡大学
助成研究者の部署・役職	工学部機械工学科・助教
助成研究者名 研究分担者名	真田 俊之
研究開発テーマ名	水蒸気と水の混合噴流による低環境負荷洗浄装置の開発
研究期間	平成18年11月30日～平成19年11月29日
研究の目的	純水と高圧水蒸気の混合噴流のみで、化学薬品を一切使用しない洗浄方法を開発する。表面洗浄、レジスト除去のメカニズムを明らかにし、最適ノズルの設計を行う。
成果の要旨 (平成18年度分)	実験的研究として洗浄プロセス流れ場の可視化・解析、また数値的研究として基本数値解析コードの開発を行った。PDAを用いて、2種類の試作ノズルの液滴流速・径分布を調査した。レジスト剥離を行う通常の運転状態においては、液滴径は $O(10\ \mu\text{m})$ 、速度は $O(100\ \text{m/s})$ であることを明らかにした。また空気と水の混合噴流についても調査を行い、液滴径・速度共に蒸気の場合と同程度であることを明らかにした。次に、レジストが剥離する過程の高速度撮影を行った。HMDS処理無しのレジストにおいて、斜め上から撮影を行うことで、レジストは $O(1\ \text{ms})$ で除去していること、またレジストの厚さ全てが一度に剥がれていることを明らかにした。このことより、このレジスト除去は化学的な手法ではなく、物理力によるものであることを明らかにした。また様々な金属片に蒸気・水混合噴流をあてその後の表面解析を行った。その結果、空気と水の混合噴流では、ほとんど何の変化も起こらないものの、水と蒸気の混合噴流の場合、多くのエロージョンが発生していることを明らかにした。数値解析においては、音速ノズルにおいて蒸気と空気の違いについて検討を行った。
研究成果外部発表、 特許等の状況	論文2件採択、国際会議2件、国内会議2件発表、 特許「対象物洗浄方法および対象物洗浄システム」 PCT/JP2007/061969 など2件出願
今後の展望	研究計画に従い、最適ノズルの設計、最適パラメータの探索を行う。 特に数値解析を援用する。また実用化へ向けての問題の洗い出しを行い、さらに研究開発を推進する。

(注) 用紙の大きさは、日本工業規格A列4判とすること。

(様式第29)

**Abstract of Technical Report of Industrial Technology Research Grant Program in FY2006**

Date of Preparation	November 29, 2007
Project ID Number	06A30701d
Name of Organization	Shizuoka University
Post of the Research Coordinator	Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering
Name of the Research Coordinator Names of the Member	Toshiyuki Sanada
Title of the Project	Development of a cleaning technique using spray mixed with steam and water
Duration of the Project	November 30, 2006 ~ November 29, 2007
Purpose of the Project	Utilizing spray mixed with steam and water, new surface cleaning technique that is low environmental load is developed.
Summary of the Results (FY2006)	In the experiments, we have observed the spray and the process of cleaning. From the measurement with PDA, the order of the diameters are $O(10 \mu\text{m})$ , and the velocities are almost 200~300 m/s. A Photo-resist stripping was observed with a high-speed video camera and it is found that this method mechanically strips the resist. Microscopy analysis on the several metal surfaces after spraying the mixture clearly shows many pits due to erosion. In the numerical analysis, we have compared with the differences between steam and air flow in a converging-diverging nozzle.
Publication, Patents, etc.	Original paper : 2, International conference : 2, Domestic conference : 2, Patents application : 2.
Future Plans	According to the study plan, optimal nozzle shape and optimal parameter will be examined. In addition, new problems will be sorted out for the practical application.

---

(注) 用紙の大きさは、日本工業規格A列4判とすること。

- ・ プロジェクト ID 番号 06A30701d
- ・ 研究期間 平成18年11月30日～平成19年11月29日
- ・ 研究開発テーマ名  
水蒸気と水の混合噴流による低環境負荷洗浄装置の開発
- ・ 助成研究者名と所属研究機関名  
真田 俊之 (静岡大学) ttsanad@ipc.shizuoka.ac.jp
- ・ 本文

## 1. はじめに

半導体製造プロセスにおいて、ウェハ表面の清浄化技術はデバイスの歩留まり、信頼性を確保する上で非常に重要である。そのため現在の ULSI 製造には、1 枚当たり 50～100 回もの洗浄が繰り返される<sup>①</sup>。現在一般的に使用されている洗浄方法は、1970 年に W. Kern と D. A. Puotinen によって提唱された RCA 洗浄を基に構成されている<sup>②</sup>。RCA 洗浄は過酸化水素水をベースとした薬液処理で、一例を示すと、SC1 (または APM) と呼ばれるパーティクルや有機物を除去する  $\text{NH}_4\text{OH}/\text{H}_2\text{O}_2$  洗浄, SC2 (または HPM) と呼ばれる金属汚染除去の  $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2$  洗浄, SPM と呼ばれる有機物を酸化してレジスト等を除去する  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$  洗浄などからなる。しかし、この RCA 洗浄は基本的に浸漬式であるため、将来型の大型口径ウェハでは大量の薬品が必要となること、ほとんどの工程が高温下で行われるため、蒸発による薬液組成変化などの問題を有する。クロスコンタミネーションなどの報告もあり、洗浄によって汚染される可能性もある。さらにこの薬品は、非常に強力な酸やアルカリであり、作業環境の安全性の確保や廃棄処理方法が問題視されており、地球環境および労働環境に負荷を与えない新しい洗浄装置が求められている。そのため、半導体の洗浄技術は、経済産業省の半導体技術戦略マップにおいて、新規洗浄技術を重要課題としてあげられている。また半導体の洗浄・乾燥装置の世界市場は 2004 年で 1800Million\$ (日本は 610Million\$) と巨額であり、その市場の半数を日本メーカーが獲得しているため、日本経済にとっても、半導体洗浄は今後重要な課題となる。

新規洗浄技術として、我々は水蒸気と水の混合噴流による全く新しい洗浄装置を開発している。本技術は、枚葉式でかつクロスコンタミネーションを防止するため、一台でレジスト除去からパーティクル除去までを可能とするものである。さらに本技術は、特許庁で公開されている「産業用洗浄技術」のどれと比較しても、全く異なる新しいものである。なお、通産省プロジェクト「超先端電子技術開発促進事業」の一環により NEDO で開発された 2 流体ジェット洗浄と類似しているが、本技術は、薬品を使用しないこと、蒸気を使用していること、圧力が非常に低いこと (0.2MPa 程度) 等の点で特徴的であり、環境負荷の点で優れている。本技術を使用することで、エッチング工程後のレジスト除去、ポリマー除去、CMP 処理後の洗浄等で非常に高い洗浄能力を確認しているが、そのメカニズムは明らかでない。

本研究の目的の第一は、本技術の洗浄機構を明らかにすることにある。洗浄機構の解明は、本技術の適用範囲を明確に規定し、ノズル等の基幹システムの最適設計に必要不可欠である。洗浄機構を明らかにすることで、それぞれの工程に応じた最適条件を明らかにし、現在の多くの洗浄技術を薬品無しの低環境負荷に変え、持続可能社会の実現に貢献を行う。

## 2. 研究開発の内容

今年度は、実験的研究として洗浄プロセス流れ場の可視化・解析、また数値的研究として基本数値解析コードの開発を行う。そのため以下、**蒸気と水の混合噴流の液滴速度、液滴径の可視化、基本洗浄特性の把握およびレジスト除去メカニズムの解明、蒸気と水の混合噴流の数値シミュレーション**であった。それぞれの結果を述べる。

### 2-1 水と蒸気の混合噴流の液滴速度、液滴径の可視化

#### 実験装置および方法

図1に本装置の概要を示す。本洗浄装置は、電気加熱により超純水から清浄な蒸気を生成し、ノズル入口部にて超純水と混合し、対象物に噴射するものである。ノズル入口での蒸気圧力  $p$  は  $0.05 \sim 0.3 \text{ MPa}$  と低圧であるのが特徴である。また混入する純水の流量  $q$  は  $100 \sim 500 \text{ mL/min}$  程度である。ノズル出口より  $10\text{mm}$  程度の位置にウェハを設置し洗浄を行う。なお使用したノズル直径は  $3.8\text{mm}$  である。噴射している噴霧液滴の液滴径、速度の計測を、PDA (Phase Doppler Anemometry, TSI 社 PDPA 1-component system) を用いて行った。次に実際にフォトレジストが剥離する様子を高速カメラにより観察した。実際の基板上での剥離観察は非常に困難なため、石英板 ( $\text{SiO}_2$ ) の上にフォトレジストを塗布し、背面より撮影を行った。また、対象物表面へのダメージを把握するため、ひずみゲージを用いて噴流による荷重を評価し、比較のため空気と水の混合噴流による結果との比較を行った。図2に荷重評価を行った装置を示す。

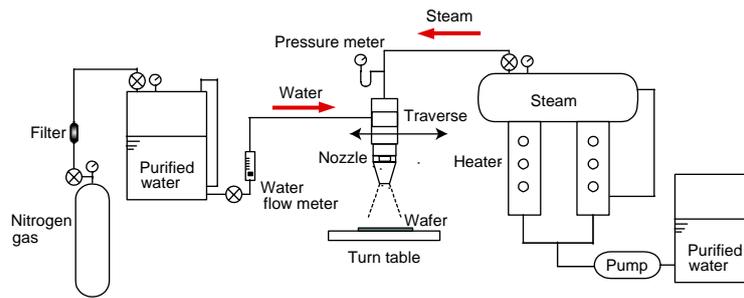


Fig.1 Schematic of experimental setup

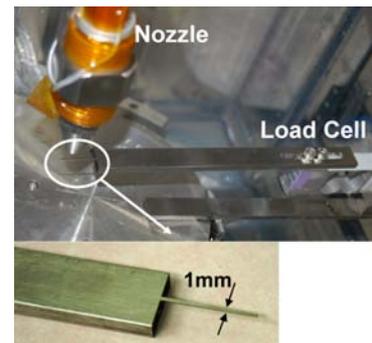


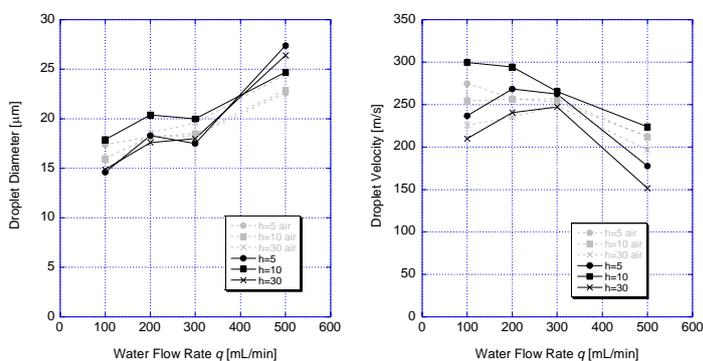
Fig.2 Pressure measurement apparatus

#### 実験結果および考察

本手法で使用している噴流の液滴速度および径を PDA により計測した。なお比較のため空気と水の混合噴流についても計測を行った。測定は、 $p = 0.1 \text{ MPa}$  で、液流量を  $100 \sim 500 \text{ mL/min}$  の範囲で変化させた。結果を図3に示す。図3 (a) に示される液滴径は、 $15 \mu\text{m} \sim 30 \mu\text{m}$  程度であり、液流量の増加と共に液滴径も増加する。また蒸気と水の混合噴流と、空気と水の混合噴流との間に大差はない。図3 (b) に示す液滴速度についても、蒸気と水の混合噴流、空気と水の混合噴流との間に大差は無く、水流量増加に伴い液滴速度は減少する。液滴速度は  $150 \text{ m/s} \sim 300 \text{ m/s}$  程度である。なお空気と水の混合噴流の場合には、ノズルからの距離が遠くなるにつれて液滴速度は減少したが、蒸気と水の混合噴流の場合では、ノズルからの距離  $h = 10 \text{ mm}$  において液滴速度が最大となった。蒸気と水の混合噴流は空気と水の混合噴流と比較して液滴径、速度に大差ないにも関わらず、洗浄力は大きく異なることが、これらの実験で示された。

近年、パターンの微細化、高アスペクト化などに伴い、対象物へのダメージが問題となっている。そのため、本手法による対象物へのダメージを把握するために、噴流が対象物へ及ぼす荷重評価を行った。なお、比較のため同じ圧力および水流量の空気と水の混合噴流でも実験を行い、比較した。図4に結果を示す。本洗浄装置で用いる噴流は低圧であるために非常に小さな荷重しか加わらないこと、また蒸気と水の混合噴流と空気と水の混合噴流とでは結果に有意な差が生じ

ないこと、さらに、水を付加しても最大でも 15%程度しか荷重は増加せず、多くの場合荷重が減少することが図 4 よりわかる。以上の実験結果より、本洗浄装置で用いる圧力は従来型の 2 流体ジェットに比べて非常に低いため、対象物へ与えるダメージは軽減できることがわかる。



(a) droplet diameter (b) droplet velocity  
Fig.3 Droplet diameter and velocity ( $p = 0.1$  MPa)

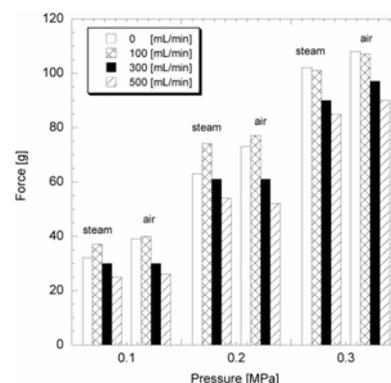


Fig.4 Load by mixture

## 2-2 基本洗浄特性の把握およびレジスト除去メカニズムの解明

### 実験装置および方法

洗浄装置としての基本性能について検討した。清浄な蒸気を生成するため、蒸気発生機の改良を行い、金属汚染の程度を ICP 質量分析装置 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer) を用いて調査した。また洗浄済みのシリコンウェハに対して、本技術を用いて処理した前後のパーティクル汚染の程度を、パーティクルカウンタ (KLA-Tencor SP1) を用いて評価した。次に、洗浄性能の評価を行った。洗浄力の指標として、パーティクル除去性能 (PRF: Particle Removal Efficiency) を用いた。次に実際にフォトレジストが剥離する様子を高速カメラにより観察した。実際の基板上での剥離観察は非常に困難なため、石英板 ( $\text{SiO}_2$ ) の上にフォトレジストを塗布し、背面より撮影を行った。空気と水の混合噴流と、蒸気と水の混合噴流を比較した際に、2-1 で示したように液滴の速度・径はほぼ等しい。違いは温度である。そのため、液滴や噴流の温度が噴射させた対象物 (アルミ合金) へ与える影響を調査した。

### 実験結果および考察

まず洗浄装置の清浄度について述べる。現状で市販されている蒸気発生装置は各種の金属が使用されており、金属汚染の可能性があるため半導体産業には直接利用できない。そのため、本洗浄装置ではテフロン等の非金属材料を利用することで金属汚染の危険性の低下を図った。通常の蒸気発生機で超純水から生成した蒸気 (before) と本装置で生成した蒸気 (after) をそれぞれシリコンウェハ上に噴射し、その後、ウェハ上の金属元素を分析した結果を表 1 に示す。表に示すように、計測機器の測定精度内で、極微量の金属しか検出できず、本手法による金属汚染の可能性は低いことが示された。次に、洗浄済みのシリコンウェハに対し、本手法を用いて洗浄を行い、洗浄前後のパーティクル数について検討を行った。洗浄前後の表面 (洗浄面) および裏面のパーティクル数について図 5 に示す。図 5 (a) に示す表面においては、洗浄によるパーティクル数の増加は認められない。さらに、洗浄機能があるために、パーティ

Table 1 Metal contamination of steam generator

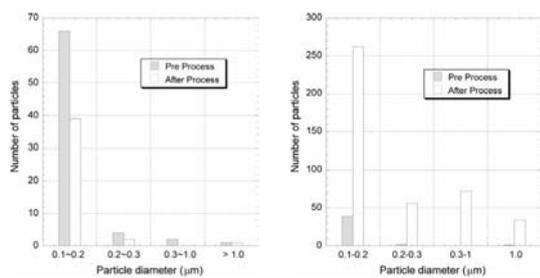
Element	Before	After
Fe	$2.1 \times 10^{+11}$	$< 2.0 \times 10^{+09}$
Cr	$2.5 \times 10^{+10}$	$< 2.0 \times 10^{+09}$
Ni	$1.5 \times 10^{+10}$	$< 4.0 \times 10^{+09}$
Cu	$8.0 \times 10^{+09}$	$< 3.0 \times 10^{+09}$
Na	$3.9 \times 10^{+11}$	$< 2.0 \times 10^{+09}$
K	$1.9 \times 10^{+11}$	$< 2.0 \times 10^{+09}$
Ca	$1.1 \times 10^{+12}$	$< 2.0 \times 10^{+09}$
Mg	$1.3 \times 10^{+11}$	$< 2.0 \times 10^{+09}$
Zn	$9.2 \times 10^{+10}$	$< 2.0 \times 10^{+09}$
Al	$4.6 \times 10^{+11}$	$< 6.0 \times 10^{+09}$
Ti	$2.6 \times 10^{+11}$	$< 2.0 \times 10^{+09}$

クル数が40%程度減少している。以上のことから蒸気による汚染は無いことが示された。なお図5(b)に示す、洗浄を行っていない裏面においては、洗浄後にパーティクル数の増加が観察された。

次に、洗浄性能について述べる。まず、様々な粒子径を持つラテックスパーティクルをウェハに塗布し、その洗浄効果を評価した。なお蒸気圧力、水流量はそれぞれ  $p = 0.2 \text{ MPa}$ ,  $q = 300 \text{ mL/min}$  と設定した。各粒子径における粒子除去率の違いを図6に示す。パーティクル径が130nm以上であれば、いずれも95%以上の高い粒子除去性能を示す。一方、100nm程度のパーティクルでは60%程度の除去率となる。そのためこの100nmスケールのパーティクルに対し、洗浄時間を増加させその影響を調べた。その結果を図7に示す。図に示すように、洗浄時間を増加させることでパーティクル除去率が増加することがわかる。以上のように本手法は100nmスケールのパーティクルも除去できる性能を有することがわかった。

次に、この洗浄力は物理力によるのか、それとも他の作用によるものなのかを確かめるため、フォトリソの剥離観察を行った。石英ウェハ上にフォトリソを塗布し、蒸気と水の混合噴流でフォトリソが剥離する際の様子を高速度観察した結果を図8に示す。このとき  $p = 0.1 \text{ MPa}$ ,  $q = 300 \text{ mL/min}$  と設定した。まず噴流が照射されたレジストにおいて数箇所が剥離した。その後、その領域が広がりながら剥離していく様子が観察された。また噴流がウェハに噴射されてから短時間でレジストの剥離にいたった。通常フォトリソ剥離は、薬品やプラズマにより分解しながら行うために、表面より徐々に剥離を行うが、本手法においては、その厚さを保ったまま界面から剥離した。また化学的作用により剥離させる場合の剥離の時間スケールは、本手法の剥離時間に比べて大きく異なる。そのため本洗浄装置では物理力を主体として洗浄を行うものであると考えられる。

最後にアルミ合金へ噴射した際の表面の結果について述べる。図9より、液滴の温度、噴流の温度が上昇するに従い、表面のエロージョン量が増加していることがわかる。以上のことよりも、本洗浄装置は物理力を主として洗浄していることが明らかにされた。



(a) front-side

(b) back-side

Fig.5 Particle number distribution

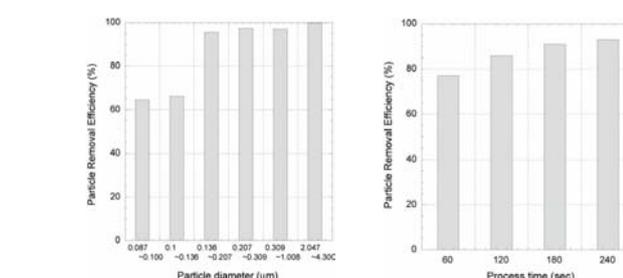


Fig.6 Particle removal efficiency

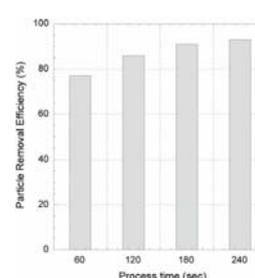


Fig.7 Effects of process time on PRE

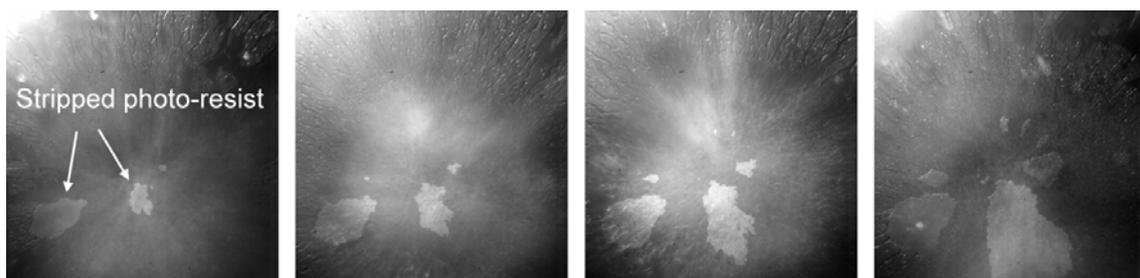


Fig.8 Visualization of resist stripping process

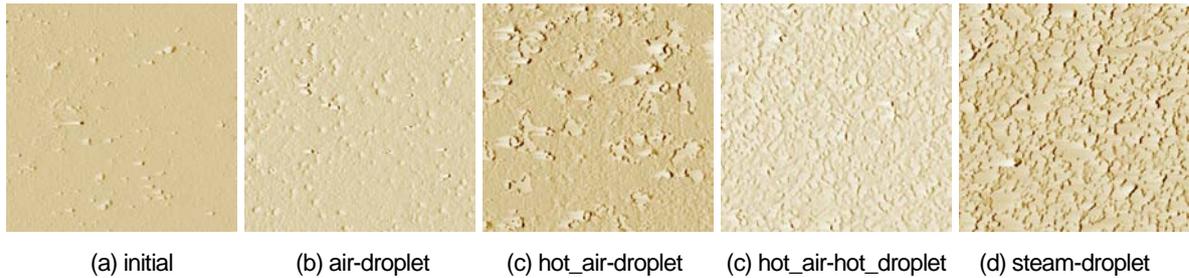


Fig.9 Erosion test (A5052, 10min,  $p=0.2\text{MPa}$ ,  $q=300\text{mL/min}$ ,  $h=10\text{mm}$ , AFM differential image)

## 2-3 蒸気と水の混合噴流の数値シミュレーション

### 計算方法

FLUENT を用いて最適ノズルを設計するための基礎的な検討を行った。モデルとなる蒸気ノズルの計算グリッドは Gambit を用いて作成する。作成した計算グリッドを図 10 に示す。その計算グリッドを用いて Fluent で数値解析をする。解析は、空気のみ、蒸気の場合に加えて、水を混合させた場合について行った。解析条件についてはノズル入口境界圧力を  $0.2\text{MPa}$ 、入口温度  $393\text{K}$ 、出口圧力  $0.1013\text{MPa}$ 、出口温度  $288.16\text{K}$  とする。ただし、初めにノズル入口境界圧力を  $0.11\text{MPa}$  に設定し、計算が収束するごとに  $0.01\text{MPa}$  ずつノズル入口境界圧力を上昇させていき、最終的に  $0.2\text{MPa}$  まで到達させる。この計算条件は実験によって計測した値である。

### 計算結果および考察

まず、空気流の解析結果を図 11 に示す。解析結果には速度分布、ノズル部の拡大図を示している。ノズルのスロート部（のど部）で急激に速度が上昇し、同時に、圧力は  $0.12\text{MPa}$  まで減圧され、温度も急激に下降する。さらに、このノズルの形状はスロート部からノズル出口にかけて徐々に内径が広がるディフューザ型の形状となっている。そのため、圧縮性を考慮したこの空気流れは、スロート部を越えると流速が音速を超えてさらに加速していく。そして、ノズル出口の手前  $7\text{mm}$  のあたりで流速は最大  $517\text{m/s}$  まで加速され、その直後に  $390\text{m/s}$  まで急激に減速されているのがわかる。また、圧力の変化も、流速が最大に達するのと同時に、 $0.048\text{MPa}$  まで減圧され、その直後に  $0.09\text{MPa}$  まで圧力は上昇する。この急激な圧力変動のため、ノズル内部には圧力波らしきものが形成される。その後、速度は徐々に減少、圧力は少しずつ上昇していき、ノズル出口から大気に噴出される。大気中に噴出された後、速度分布については、円錐状の流速の速い域から、放射状の流速の遅い域へと変化していく。

次に、蒸気みの解析結果を図 12 に示す。空気流の解析結果の場合と同様に、スロート部において水蒸気の流れは急激に上昇し、圧力は  $0.125\text{MPa}$  まで減圧され、温度も下降する。そして、水蒸気の流れはノズル出口の手前  $5.7\text{mm}$  まで音速を超えて加速していき、最大  $655\text{m/s}$  にも達する。このことから、最も流れが加速される場所において、水蒸気の流れのほうが空気の流れよりも速いことがわかる。その直後に、水蒸気の流れも  $473\text{m/s}$  まで減速される。それに伴い、圧力の変化も、流速が最大に達するのと同時に、 $0.051\text{MPa}$  まで減圧され、その直後に  $0.097\text{MPa}$  まで圧力は上昇する。その結果、空気流のときと同様に、ノズル内部に圧力波らしきものが形成される。最後に、高温水蒸気と純水液滴の混合流のモデルについて述べる。

図 13 に高温水蒸気に三種類の径の純水液滴を流したときの速度変化の図を示しており、比較対象として高温空気に三種類の径の純水液滴を流したときの速度変化を図 14 に示している。液滴の解析の初期条件としては、初期位置はノズルの中心軸上でノズル出口から  $50\text{mm}$  手前であり、初期速度は  $0\text{m/s}$ 、液滴径はそれぞれ  $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$  とした。液滴はその径にかかわらずスロート部を過ぎると連続相の速度変化に伴って速度を急激に上げる。そして、液滴径が小

さい、つまり、質量が小さいほど加速度は大きいことがわかる。その後、それぞれの径を持つ液滴は連続相の速度とほぼ等しくなるまで速度を上昇させ、その速度をピークにして、今度は減速をしていく。また、減速の傾向についても、液滴径が小さいほど減速の勾配は大きくなっていることがわかる。その結果、液滴径が  $5 \mu\text{m}$  のときは、すでにノズル内部で減速を開始しているのに対し、 $10 \mu\text{m}$  以上のときはノズルから噴出後も加速し続けている。そのため、最終的には、ノズル出口から  $100 \mu\text{m}$  の位置では液滴径別の速度の順位が完全に逆転しており、液滴径が  $20 \mu\text{m}$  のときの速度は  $135 \text{ m/s}$  を示している。このことは比較対象である図 1 4 についても同様のことが言えるが、空気流の方は水蒸気流に比べて連続相の速度の最大値が小さいため、液滴の速度の最大値にも同様の影響が見られる。

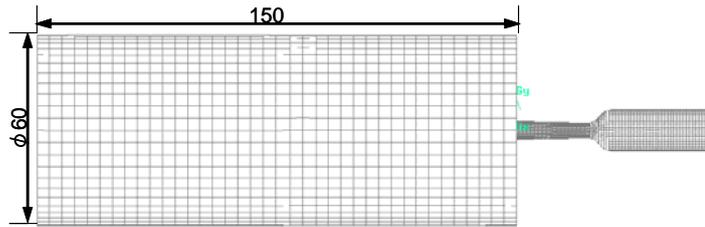


Fig.10 Computational grid

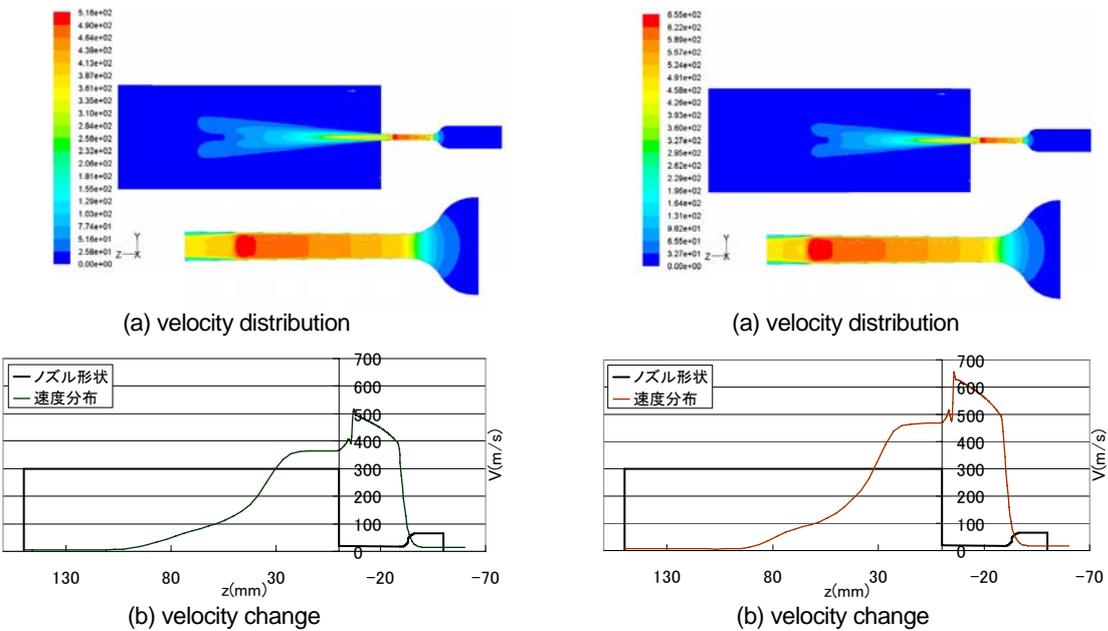


Fig.11 Calculation result (air)

Fig.12 Calculation result (steam)

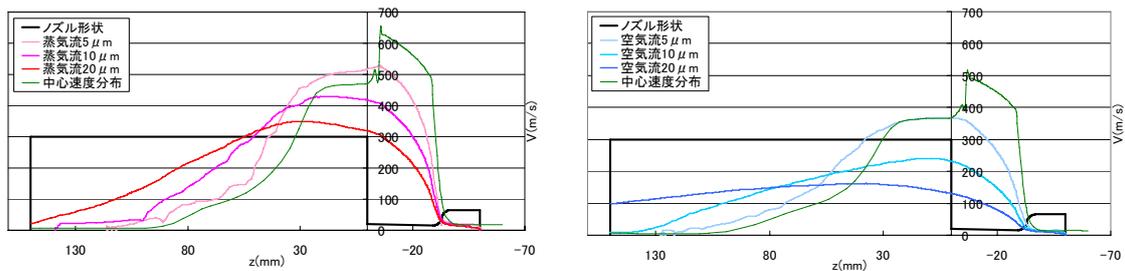


Fig.13 Droplet velocity (steam)

Fig.14 Droplet velocity (air)

### 3. まとめ

これまでの実験結果を基に本技術の洗浄メカニズムのモデルを提案しまとめとする。

蒸気と水の混合噴流が空気と水の混合噴流と比較して異なる点として、まず液滴の温度が上げられる。高速な液滴が固体壁面に衝突した際には、その液滴内に衝撃波が発生すること、さらにその衝撃波が液滴上部まで達すると、自由界面で反射して膨張波が生成することが知られている<sup>(3)(4)</sup>。また、その膨張波によって液滴内にキャビテーションが発生する可能性があることが実験的にも確認されている<sup>(5)(6)</sup>。さらに、キャビテーションによる壊食は温度依存性を有し、最適温度が存在することも報告されている<sup>(7)</sup>。このことを考慮すると、高温の液滴が形成される蒸気と水の混合噴流の場合には空気と水の場合に比べてキャビテーションが発生しやすく、洗浄効果が現れたのではないかと考える。また周りが蒸気雰囲気であるために、液滴内部に捕捉された蒸気気泡などは、液滴衝突時やキャビテーション崩壊時に生じる衝撃波により、容易に崩壊する可能性がある。そのため、マイクロジェット等が発生し洗浄に寄与すると考える。以上のことを示したものが図15である。

また、蒸気と水の混合噴流の特異な点として、凝縮の効果が考えられる。PDAによる液滴速度計測において計測されたように、蒸気と水の混合噴流の場合には、ノズルからのある一定位置において、速度の最大値が観察された。これは凝縮の効果によるものではないかと考察する。通常の噴流において液滴は、その周囲の気流に流されているために、気流の最大速度の箇所での液滴速度も最大となる場合が多い。ところが蒸気と水の混合噴流の場合、液滴速度は周囲の速度分布だけでなく周囲の温度・圧力にも影響され、凝縮しながら径が増大し、慣性力の影響でノズルから一定位置において最大値が観察されたのではないかと考える。またこの現象は壁面に衝突する際にも発揮され、通常よどみ点となる壁面上では圧力、温度が上昇するために液滴の速度も大きく減少するが、蒸気と水の噴流の場合、液滴が凝縮するために、比較的高速を保ったまま壁面に衝突する可能性がある。この凝縮の効果を図16に示す。さらに凝縮の効果は洗浄対象物にも現れると考える。表面に非常に微細なパターン溝がある場合、通常表面張力によって溝は完全に濡れない。そうすると溝の中にあるパーティクル等はいくら液滴を衝突させても取ることはできない。一方蒸気は表面で凝縮するため、細かな溝も完全に濡らすことができ、そこに液滴が衝突すれば、その衝撃波等でパーティクルを取ることが可能である<sup>(8)</sup>。また捕捉された蒸気気泡なども簡単に崩壊させることができる。このようなモデルの概略を示したものが図17である。以上、本洗浄装置では「温度」と「凝縮」の効果を利用していると考えられる。

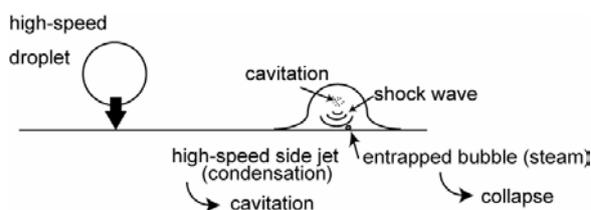


Fig.15 Schematic of shock wave generation

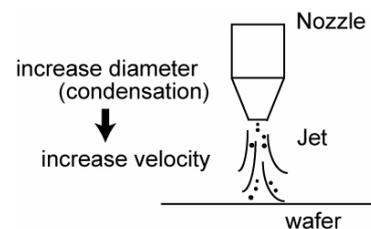


Fig.16 Schematic of condensation effects

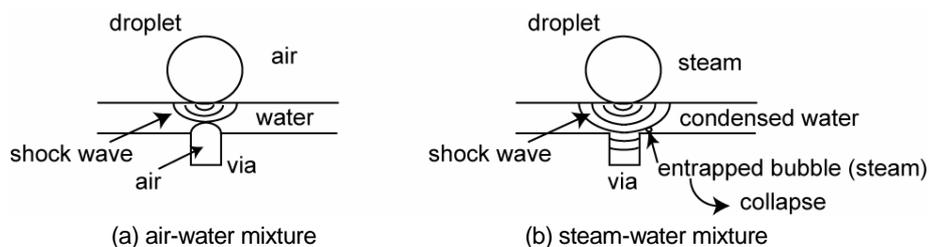


Fig.17 Schematic of differences between steam-water and air-water mixture

#### 4. 今後の展望

以上で述べたモデルは現時点では実験結果を説明するために構築した仮説であり、今後実験および数値解析によって、より詳細な研究を行う予定である。また研究計画に従い、最適ノズルの設計、最適運転条件の探索を行い、実用化へ向け研究開発を推進する。

##### ・ 引用文献

- (1) 大見忠弘, 半導体製造プロセスと材料, シーエムシー出版 (2005).
- (2) W. Kern and D. A. Puotinen, RCA Review 31, pp.187-206 (1970).
- (3) M. Rein, Fluid Dynamics Research 12, pp.61-93 (1993).
- (4) K. K. Haller, Y. Ventikos and D. Poulikakos, Journal of Applied Physics, 92-5, pp.2821-2828 (2002).
- (5) J. H. Brunton and M. C. Rochester, Erosion of Solid Surfaces by the Impact of Liquid Drops, Treatise on Material Science and Technology 16 Academic Press, pp.185-248 (1979).
- (6) M. Rein, Drop-Surface Interactions, Springer Wien New York (2002).
- (7) 加藤洋治, キャビテーション, 槇書店 (1999).
- (8) J. M. Lee and K. G. Watkins, Journal of Applied Physics 89-11, pp.6496-6500 (2001).

##### ・ キーワード

半導体洗浄, レジスト除去, 蒸気, 噴流, キャビテーション

##### ・ 研究成果外部発表等

#### 学会発表

- (1) 真田俊之, 城田農, 渡部正夫, 山瀬雅男, 「水蒸気と水の混合噴流によるレジスト剥離・洗浄装置の開発」, 第26回混相流シンポジウム, 札幌, (2007). (パネルディスカッション)
- (2) Toshiyuki Sanada, Minori Shirota, Masao Watanabe, Yoshihisa Morita and Masao Yamase, "Resist stripping and surface cleaning technique using high speed steam-droplet mixture", 5<sup>th</sup> Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference (FEDSM2007), San Diego, California, USA, (2007).
- (3) 真田俊之, 齋藤隆之, 城田農, 渡部正夫, 森田整尚, 山瀬雅男, 「蒸気と水の混合噴流によるレジスト剥離」, 2007年秋季第68回応用物理学会学術講演会, 札幌, (2007).
- (4) Toshiyuki Sanada, Takayuki Saito, Minori Shirota, Masao Watanabe, Yoshihisa Morita and Masao Yamase, "High speed steam-droplet spray impacts on solid surface", The 1st International Colloquium on Dynamics, Physics and Chemistry of Bubbles and Gas-Liquid Boundaries, Niseko, (2007).

#### 原著論文

- (1) 真田俊之, 齋藤隆之, 林田充司, 斉藤輝夫, 山瀬雅夫, 渡部正夫, 蒸気と水の混合噴流による洗浄技術の開発, 噴流工学, vol.24, No.3, pp.4-10, (2007).
- (2) Toshiyuki Sanada, Masao Watanabe, Minori Shirota, Masao Yamase and Takayuki Saito, "Impact of High-speed steam-droplet spray on solid surface", Fluid Dynamics Research, in press.

##### ・ 特許等

- (1) 山瀬雅男, 森田整尚, 渡部正夫, 真田俊之, 城田農, 「対象物洗浄方法および対象物洗浄システム」(出願中) PCT/JP2007/061969
- (2) 山瀬雅男, 森田整尚, 渡部正夫, 真田俊之, 城田農, 「ピーニング加工による金属材料の表面改質方法及びそのシステム」(出願中) PCT/JP2007/061970