オゾンマイクロバブルを用いた高機能洗浄技術*

High Performance Removal Technology using Ozone Microbubble

新井 香裕**
ARAI Yoshihiro

阿部 豊**
ABE Yutaka

金子 暁子**
KANEKO Akiko

池 昌俊***
IKE Masatoshi

Abstract The removal technology of single-wafer processing using ozone is proposed on photoresist removal in the semiconductor manufacturing. Ozone is friendly for the environment and no harm to the product. Before now, the authors indicated that disk-shaped nozzle forms a vortex structure between the disks which is considered to cause the reduction of photoresist removal rate. This study proposes a disk-shaped convex nozzle to suppress the vortex. In order to investigate the effects of the presence or absence of the convex, the removal experiments were conducted. As a result, disk-shaped convex nozzle had the higher removal ability than disk-shaped nozzle in the convex part.

Next, as a new removal method, we suggest the ozone microbubble with a Venturi tube. To investigate the performance of the photoresist removal with it, first, the generation of ozone microbubbles is observed in the Venturi tube via a high speed video camera. Next, to clarify the effect of the superficial liquid and gas velocities, the ozone microbubble, and presence or absence of convex, ozone water concentration measurement and photoresist removal experiments were conducted. As a result, the ozone water concentration increased with increasing superficial velocity and the remaining photoresist thickness reduced. Also, ozone microbubble had the higher removal ability than ozone water single-phase. Compared presence and absence of convex, convex influenced photoresist removal efficiently. In addition, compared with the existing study, it is suggested that the superficial liquid and gas velocities and ozone water concentration affect the photoresist removal rate.

Keywords: Photoresist removal, Rotating disk, Convex, Ozone microbubble, Venturi tube

1. 緒言

半導体製造過程のフォトリソ除去では、従来、熱濃硫酸などの薬液が用いられており、環境への負荷や残留硫酸基の品質への悪影響が問題となっている。対策として、環境に優しく、残留硫酸基が発生しない、オゾン水を用いた洗浄方法が提案されている。オゾンを用いた洗浄手法としては、オゾン水単相で洗浄するものとオゾンマイクロバブルにより洗浄するものが提案されている。オゾンマイクロバブルとは、オゾンを含む直径1 mm以下の微細気泡を指している。オゾンマイクロバブルによるレジスト洗浄に関して、

Takahashiらは、加圧溶解式のオゾンマイクロバブルを用いることで、オゾン水濃度が上昇し、洗浄速度が向上することを示した[1,2]。しかし、その洗浄効率は熱濃硫酸の場合と比較して劣るため、幅広く実用化されるには至っていない。

そこで、著者らはこれまでに、高効率なオゾン洗浄手法として、Fig. 1(a)のような円盤型ノズルを用いてオゾン水を注流する枚葉式スピン洗浄を提案している。しかしながら、円盤型ノズルを用いると円盤終端部においてレジスト洗浄効率低下の一因として考えられる渦構造の形成が実験的に確認された[3-7]。

* 2016.4.24 受付

** 筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
TEL: (029)853-5226 FAX: (029)853-5226 E-mail: abe@kz.tsukuba.ac.jp

*** 合同会社アプテックス

Fig. 1 Detail of nozzle shape.

そこで本研究では、渦構造を抑制し、レジスト洗浄効率を向上させるために、Fig. 1(b)のように円盤終端部に段差を設けた円盤段差付きノズルを提案する。また、更なる洗浄効率向上のための手法として、ベンチュリ管を用いてオゾンマイクロバブルを生成し、オゾンの気液二相流により洗浄を行う手法を提案する[8-11]。その手法として、Fig. 1(c)と(d)に示すように、ベンチュリ管式円盤型ノズルと段差を設けたベンチュリ管式円盤段差付きノズルをあげる。ベンチュリ管によるレジスト洗浄は高い洗浄効果が期待されるものの、ベンチュリ管式オゾンマイクロバブルによるレジスト洗浄性能について全く調べられていないのが現状である。

そこで本研究は、オゾン水単相における段差の有無とベンチュリ管式オゾンマイクロバブルの洗浄効果の解明を目的とする。オゾン水単相におけるレジスト洗浄実験、ベンチュリ管内流動の可視化、気泡径計測、オゾン水濃度計測、液相および気相見かけ速度・洗浄時間・オゾンマイクロバブルの有無・段差の有無を変更したレジスト洗浄実験、オゾン水単相や既存研究との比較を通して本洗浄手法の有用性を調べる。

2. オゾンを用いた実験装置

2.1 オゾン水単相における実験装置

実験に用いたノズルについて、Fig. 1(a)はノズル射出部に直径 125 mm の円盤を取り付けた従来の円盤型ノズルである。Fig. 1(b)は円盤型ノズルにおいて半径位置 25.7 mm から 35.7 mm までの間に回転円盤との間隔 z が 2.0 mm から 0.5 mm となるように段差を設けた円盤段差付きノズルである。下部回転円盤は直径 250 mm であり、時計回りに回転する。

レジスト洗浄実験において使用した実験装置の概略図を Fig. 2 に示す。実験装置全体は全てメタルフリーで構成した。生成したオゾン水 10 L をタンクにいれ、各ノズルを用いて 400 s、レジスト洗浄を行った。使用したオゾン水はドレインから排出される。使用したシリコンウェハは、Philtech 社製の直径約 200 mm の 8 inch ウェハである。シリコンウェハ表面には全面に渡って膜厚が 1000 nm で均一となるように i 線ポジ型フォトリソが塗布されている。レジスト洗浄後の残存レジスト膜厚を膜厚測定器 (Avantes 社製 AvaSpec-2048-USB2) を用いて測定した。実験条件は、回転速度 $\Omega = 300 \text{ rpm}$ 、水流量 $Q = 1.0 \text{ L/min}$ 、円盤間隔 $z = 2.0 \text{ mm}$ とした。実験に用いたオゾン水濃度は KI 法により測定し、円盤型ノズルの時は $C_L = 22.1 \text{ mg/L}$ 、円盤段差付きノズルでは $C_L = 24.9 \text{ mg/L}$ である。

2.2 オゾンマイクロバブルにおける実験装置

ここではベンチュリ管を用いてオゾンマイクロバブルを生成し、レジスト洗浄を行う。まず、レジスト洗浄実験を行う前に、ベンチュリ管によりオゾンマイクロバブルが生成される様子を調べる。

オゾンマイクロバブルに関する実験で用いた実験装置の概略図を Fig. 3 に示す。ベンチュリ管を用いた実験装置においては、液相供給部、気相供給部、洗浄部の3つで構成されている。液相供給部は、タンク（60 L）とポンプ、流量調整のためのインバータ、渦流量式液相流量計（Keyence 社製 FD-P20）で構成されている。気相供給部は、酸素ボンベ（純度 99.99%）とバルブ、スピードコントローラ、渦流量式流量計（Keyence 社製 FD-A1、FD-A10）、オゾンガス発生装置（アプテックス社製 O3G-C180U）から成る。洗浄部は、気相混合部、ベンチュリ管で構成されている。ベンチュリ管内の流動を調べるため、ハイスピードビデオカメラにより撮影した。撮影条件は、撮影速度 22,003 fps、シャッター速度 45 μ s である。可視化の際はベンチュリ管出口を大気開放した状態で、メタルハライドランプで後ろからベンチュリ管に光を当てながらバックライト法にて行った。オゾン水濃度計測時には、ベンチュリ管出口にオゾン水濃度計測器（Applies 社製 OD-UND）を接続し、紫外線吸収法により濃度計測を行った。

ここではi線フォトリソを塗布したシリコンウェハに対してオゾンマイクロバブルを噴射し、洗浄実験を行う。高価なシリコンウェハを経済的に利用するため、ウェハの一部を用いる場合と 8 inch ウェハ全体を用いる場合について実験を実施した。まず、洗浄性能を調べるために噴流直下のみ評価する場合の実験装置を Fig. 3 に示す。この場合には、一辺 30 mm に切り出したレジストをアクリル製のフォルダーに入れ、ベンチュリ管の噴流直下に垂直に設置する。管出口とレジストの間隔は 25 mm である。本実験装置では、円盤型ノズル等は使用せず、回転もしない条件となる。

次に、レジスト全体を評価する場合の実験装置を Fig. 4 に示す。本実験装置では、ベンチュリ管に円盤型ノズルや円盤段差付きノズルを使用し、流速や段差の有無によってレジスト洗浄効果に与える影響を調べる。洗浄実験時は、円盤間にお

Fig. 2 Schematic of the experimental apparatus to remove with ozone water single-phase.

Fig. 3 Schematic of the experimental apparatus to remove with the Venturi tube.

Fig. 4 Schematic of the experimental apparatus to remove with rotating.

いてオゾン水の液膜は形成されず、気相と液相が混ざった流動様式となる。本実験では、水道水を用いた。いずれの実験においてもタンク内の水温は20~25℃の範囲で一定であることを確認している。

使用したベンチュリ管は、Fig. 5に示すような透明なアクリル製であり、Fig. 5(a)のベンチュリ管は、断面が矩形、入口部の幅14 mm、奥行き5 mm、喉部の幅4 mm、出口部の幅8.2 mm、開き角6°である。また、Fig. 5(b)のベンチュリ管は、断面が円形、喉部の幅2 mm、出口部の幅9 mm、開き角6°である。それぞれのベンチュリ管の先端には、半径62.5 mmの円盤ノズル又は円盤段差付きノズルを取り付ける。比較対象であるオゾン水単相の実験では、直径9 mmのストレート管を使用し、オゾン水の生成方法としてオゾン溶解膜モジュール（住友電工フラインポリマー社製PM-201FPG）を用いた。

ベンチュリ管における実験条件をFig. 6に示す。ベンチュリ管入口圧力を計測した結果より入り口圧力を150 kPaと仮定し、このときに喉部で気液二相流の流速が音速に達する条件を図中に実線で示す。この線より液相見かけ流速 j_{Lin} が大きい場合には喉部以下の流れが超音速流れになり、急激な圧力変化とそれに伴う気泡崩壊が発生すると考えられる。この実線よりも液相見かけ流速 j_{Lin} が小さい場合には、流れが超音速にならず、急激な圧力変化は発生しないと考えられる。Uesawa らや Kaneko ら、Tamura らにより、のど部で流速が音速に達するか否かで拡大部での流動が大きく変化し、洗浄に影響を与える[8-10]ことが示唆されていることから、本条件では、超音速を超える場合と超えない場合の両方を比較するため、図中の赤丸で示す条件で実験を行う。

3. オゾン水単相におけるレジスト洗浄実験

Fig. 2に示す実験装置を用いてレジスト除去を行った後のレジスト表面の様子をPhoto 1に示す。Photo 1の左側は円盤型ノズルの結果を、Photo 1の右側は円盤段差付きノズルによる結果を示す。シリコンウェハ表面はレジストの除去量により色が変化する。Photo 1のシリコンウェハは共にノズル流入部では色の変化が著しく、端に向かうにつれ色の変化は少ない。また、Photo 1の右側は、Photo 1の左側と比較すると、段差部分にお

Fig. 5 Detail of disk-shaped and disk-shaped convex nozzle with two Venturi tubes.

Fig. 6 Experimental conditions.

いて色の違いがみられる。これはレジストの除去量に変化していることが原因である。

そこで、シリコンウェハ表面の残存レジスト膜厚を膜厚測定器によって測定した結果をFig. 7に示す。いずれも洗浄時間 $T = 400$ sとした。円盤型ノズルと円盤段差付きノズルでは、レジスト全面に渡って残存レジスト膜厚に違いがみられた。これは、レジスト洗浄を行う際のオゾン水濃度が、円盤型ノズルでは22.1 mg/Lであり、円盤段差付きノズルでは24.9 mg/Lと違いがあったことが影響しているものと考えられる。両ノズル共に、ノズル流入部においてレジストが最もよく除去されているのがわかる。残存レジスト膜厚は円盤終端部に向かうにつれて少なくなり、円盤全体で残存レジスト膜厚が不均一であることがわか

る。円盤段差付きノズルでは、円盤型ノズルと比較して、段差部分においてレジストがより除去されているのがわかる。レジストは段差が始まる半径位置からよく除去され始めるのではなく、段差が終わる半径位置付近からより除去され始め、円盤端に向かうにつれて残存レジスト膜厚が円盤型ノズルと同様の値に近づいている。

4. オゾンマイクロバブルにおける実験結果

4.1 管内・円盤間流動とレジスト洗浄性能

オゾンマイクロバブルにおけるレジスト洗浄について、液相・気相見かけ速度 j_{Lin} 、 j_{Gin} を変えた時のベンチュリ管内における気泡挙動の変化を観察した結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8(A) は、 $j_{Lin} = 0.83$ m/s、 $j_{Gin} = 0.04$ m/s における気泡崩壊挙動であり、丸印で示すように、気泡は喉部に流入後、引きちぎられるように分裂する様子が観察された。一方、Fig. 8(B) の $j_{Lin} = 1.66$ m/s、 $j_{Gin} = 0.09$ m/s においては、流入した気泡がベンチュリ管喉部を通過後に膨張し、急激に収縮・崩壊し、微細気泡が生成されている様子が見られた。これより、流速を変えることでベンチュリ管内の流動が大きく変わることがわかる。

次に、高速度ビデオカメラにより得られた画像から、画像処理によりベンチュリ管出入口における気泡径分布を算出した結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9(A) から、 $j_{Lin} = 0.83$ m/s、 1.66 m/s のどちらにおいても、ベンチュリ管入口に比べ出口では気泡径が小さくなるのがわかる。また、出口における気泡径の最頻値は、 $j_{Lin} = 0.83$ m/s、 1.66 m/s においてそれぞれ直径 $150\text{ }\mu\text{m}$ 、 $100\text{ }\mu\text{m}$ となり、 $j_{Lin} = 1.66$ m/s の方が小さな気泡径であることが確認された。これは、見かけ速度を増加させることで Fig. 8 で見られた気泡崩壊挙動の違いを引き起こし、気泡径分布の違いに影響が出たと考えられる。

ベンチュリ管出口におけるオゾン水濃度を調べた結果を Table 1 に示す。 $j_{Lin} = 1.66$ m/s では 8 mg/L と、 $j_{Lin} = 0.83$ m/s の時の 6 mg/L より高い濃度となっていることがわかる。このことから、ベンチュリ管内挙動およびオゾンマイクロバブルの気泡径がオゾン水濃度に影響を与えていることが考えられる。

ベンチュリ管式オゾンマイクロバブルにおける噴流直下のレジスト洗浄性能を調べるために、Fig. 3 に示す実験装置を用いて流速を変更しレジ

Photo 1 Surfaces of photoresist after removal.

Fig. 7 Thickness of remained photoresist in ozone water single-phase.

Fig. 8 Snapshots of bubbles in the Venturi tube.

(A) $j_{Lin} = 0.83$ m/s. (B) $j_{Lin} = 1.66$ m/s.

Fig. 9 Bubble diameter.

スト洗浄実験を行った。洗浄後のレジスト表面を Fig. 10 に示す。表面の色が流速および洗浄時間に伴い異なることがわかる。Fig. 10(A)②と(B)④を比較すると、②においては、まだレジストが存在している様子に対して、④では銀色となり噴流直下位置のレジストがすべて除去されている様子が分かる。

次に、残存レジスト膜厚を定量評価するために白色点線上(Fig. 10②)に一直線に①～④までを計測した結果を Fig. 11 に示す。どちらの流速においても、洗浄時間の増加と共に残存レジスト膜厚が減少していることがわかる。また、 $j_{Lin} = 1.66$ m/s では、 $j_{Lin} = 0.83$ m/s に比べて、同じ洗浄時間において残存レジスト膜厚が薄いことがわかった。 $j_{Lin} = 1.66$ m/s において、噴流直下ですべてのレジストが除去されることが確認された。

次に、喉部幅 4 mm のベンチュリ管式円盤型ノズルを用いてレジスト全体の洗浄評価を行った結果を Fig. 12 に示す。実験条件は、入口液相見かけ流速 0.83、1.66 m/s、気相体積流量比 5 %、回転速度 300 rpm、円盤間隔 2 mm、洗浄時間 $T = 8$ min とした。赤線は流速 1.66 m/s、青線は流速 0.83 m/s の時の結果であり、流速が大きい方が、残存レジスト膜厚が少ないことがわかる。これは、Fig. 11 に示した結果と同様であることから、レジスト洗浄に与える流速の影響が大きいことを示唆する。

次に、オゾンマイクロバブルの有用性を調べるために、オゾン水単相との比較を行った結果を Fig. 13 に示す。これは、円盤型ノズルにより、液相流量 $Q_L = 20$ L/min、気相流量 $Q_G = 1.05$ L/min、回転速度 $\Omega = 300$ rpm、円盤間隔 $z = 2.0$ mm、洗浄時間 $T = 5$ min とした時の結果である。まず、生成されるオゾン水濃度は、オゾン水単相において 4 mg/L であるのに対して、オゾンマイクロバブルでは 8 mg/L であることから、本洗浄手法のオゾン水生成効率が高いことがわかる。洗浄結果を見ると、全体としてオゾンマイクロバブルにおいて残存レジスト膜厚が少ないことがわかる。また、残存レジスト膜厚の傾向を見ると、オゾン水単相ではノズル中心と円盤端で膜厚にばらつきがあるのに対し、オゾンマイクロバブルではばらつきが少なく、均一に洗浄されている様子が見られる。これは、本洗浄手法の特徴であると考えられる。

次に、Fig. 5 に示す喉部幅 2 mm のベンチュリ

Table 1 Ozone water concentration.

Ozone water concentration outlet of the venturi tube C_{Lout} [mg/L]	6	8
Superficial liquid velocity j_{Lin} [m/s]	0.83	1.66
Superficial gas velocity j_{Gin} [m/s]	0.04	0.09
Gas volume flow ratio β [%]	5	5

(A) $j_{Lin} = 0.83$ m/s. (B) $j_{Lin} = 1.66$ m/s.

Fig. 10 Surfaces of photoresist after removal.

Fig. 11 Thickness of remained photoresist under the Venturi tube.

Fig. 12 Thickness of remained photoresist on a whole silicon wafer.

管を用いて段差の有無によるレジスト洗浄実験を行った結果を Fig. 14 に示す。実験条件は、液相流速 $j_{Lin} = 0.249$ m/s、気相流速 $j_{Gin} = 0.013$ m/s、円盤間隔 $z = 2.0$ mm、回転速度 $\Omega = 300$ rpm、洗浄時間 $T = 10$ min とした。その結果、段差部分から円盤端までの領域において円盤段差付きノズルの方が小さい残存レジスト膜厚となることがわかった。これより、オゾンマイクロバブルにおいても、円盤に段差を設けることでオゾン水単相と同様に段差部分で高い洗浄効果を有することが示された。

4.2 既存研究との比較

本研究によるレジスト洗浄実験で得られた洗浄速度を整理し、既存の洗浄体系と比較する。比較対象には産業総合技術研究所の Takahashi らのレジスト洗浄実験結果を引用した[1]。Takahashi らは加圧溶解式オゾンマイクロバブル生成法を用いてレジスト洗浄実験を行っている。既存手法である Takahashi らの洗浄結果と本研究における実験結果を比較したものを Fig. 15 に示す。本洗浄技術における洗浄速度は、最もレジスト洗浄速度が大きい噴流直下位置における値を使用した。オゾンマイクロバブルによる洗浄は 0.5 分間洗浄した結果であり、オゾン水単相による洗浄は 5 分間洗浄した結果を示している。青色の四角のプロットは液相流速 $j_{Lin} = 0.83$ m/s において気相流速を変えた時の結果を示しており、赤丸のプロットは、液相流速 $j_{Lin} = 1.82$ m/s、1.66 m/s において気相流速を変更させた時の結果、紫色の砂時計の形のプロットはオゾン水単相において液相流速 $j_{Lin} = 5.24$ m/s とした時の結果を表している。まず、オゾンマイクロバブルによる結果は、オゾン水単相に比べて高い洗浄速度を有している。そして、オゾンマイクロバブルにおける洗浄は、流速及びオゾン水濃度の増加に伴い、レジスト洗浄速度が増加していることがわかる。また、既存手法である Takahashi らの結果と比較すると、液相流速 $j_{Lin} = 0.83$ m/s においては、既存手法と同じまたは約 2 倍であるのに対し、液相流速 $j_{Lin} = 1.66$ m/s では、既存手法に比べて約 2~4 倍高い洗浄速度となることが分かった。以上のことから、本洗浄手法が既存手法に比べて高い洗浄効果を有することが示唆された。

Fig. 13 Thickness of remained photoresist with ozone water and ozone microbubble flow.

Fig. 14 Thickness of remained photoresist with disk-shaped and disk-shaped convex nozzle.

Fig. 15 Comparison with previous study[1].

5. 結 言

本研究では、オゾン水単相における段差の有無とベンチュリ管式オゾンマイクロバブルの洗浄効果の解明を目的として、以下の知見を得た。

- ・円盤型と円盤段差付きノズルでレジスト洗浄実験を行い、段差部分において円盤段差付きノズルの方がレジストをより除去することが、オゾン水単相とオゾンマイクロバブルの両方で示された。
- ・流速を変えることで、ベンチュリ管内流動が変化し、流速が大きい条件では、より微細なオゾンマイクロバブルが生成されることを確認した。
- ・ベンチュリ管式オゾンマイクロバブル洗浄は、オゾン水単相による洗浄に比べて、管出口のオゾン水濃度が大きく、高い洗浄効果を有することが示された。
- ・洗浄時間の増加や入口液相流速の増加に伴い、残存レジスト膜厚が減少することが示された。
- ・ベンチュリ管式オゾンマイクロバブルによる洗浄は、流速およびオゾン水濃度の影響を強く受け、既存手法に比べて、約 2~4 倍高い洗浄速度を有することがわかった。

謝 辞

本論文では、JSPS 科研費 15K05781 の助成を受けた。ここに、感謝の意を表する。

Nomenclature

d	: thickness of remained photoresist	[nm]
j	: superficial velocity	[m/s]
r	: radial position	[mm]
Q	: Liquid rate	[L/min]
D	: bubble diameter	[mm]
C	: ozone water concentration	[mg/L]
T	: time	[s]
z	: distance between disks	[mm]

Greek letters

β	: gas volume flow ratio	[%]
Ω	: rotating speed	[rpm]
η	: photoresist removal rate	[nm/min]

Subscripts

G	: gas phase (ozone)
L	: liquid phase (water)
in	: inlet
out	: outlet

参考文献

- [1] Takahashi, M., Ishikawa, H., Asano, T. and Horibe, H., Effect of Microbubbles on Ozonized Water for Photoresist Removal, J. Phys. Chem. C, Vol. 116, 12578-12583 (2012).
- [2] Takahashi, M., Chiba, K. and Li, P., Free-Radical Generation from Collapsing Microbubbles in the Absence of a Dynamic Stimulus, J. Phys. Chem. B, Vol. 111(6), 1343-1347 (2007).
- [3] Soong, C.-Y., Wu, C.-C., Liu, T.-P. and Liu, T.-P., Flow Structure between Two Co-Axial Disks Rotating independently, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 27, 295-311 (2003).
- [4] Kobayashi, M. and Abe, Y., CFD Analysis of Flow Structure between Rotating Disks for Semiconductor Photoresist Stripping Using High Concentrated Ozone Water, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol. 79(806), 1900-1914 (2013).
- [5] Kobayashi, M. and Abe, Y., Study on the Flow Structure between Rotating Disks for Semiconductor Photoresist Stripping Using High Concentrated Ozone Water, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 79(806), 1915-1926 (2013).
- [6] Abe, Y., Fujimori, K. and Ike, M., Photoresist Removal System (in Japanese), Japanese Patent, No. 2008-311256 (2008).
- [7] Abe, Y., Fujimori, K. and Ike, M., Photoresist Removal Method (in Japanese), Japanese Patent, No. 2008-311257 (2008).
- [8] Uesawa, S., Kaneko, A., Nomura, Y. and Abe, Y., Fluctuation Void Fraction in the Microbubble Generator with a Venturi Tube, Proc. ASME/JSME/KSME Joint Fluids Eng. Conf., Paper No. AJK2011-10014 (2011).
- [9] Kaneko, A., Nomura, Y., Takagi, S., Matsumoto, Y. and Abe, Y., Bubble Break-Up Phenomena in a Venturi Tube, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.78(786), 207-217 (2012).
- [10] Tamura, N., Kaneko, A., Uesawa, S., Abe, Y. and Ike, M., Development of Non-chemical Micro-bubble Washing Technology Using a Venturi Tube, Japanese Journal of Multiphase Flow, Vol. 27(5), 577-584 (2014).
- [11] Abe, Y. and Ike, M., Removal System and Removal Method (in Japanese), Japan patent-pending, No. 2013-177309 (2013).