固体表面に衝突する単一液滴変形過程の観察* (液滴物性, 対象物表面粗さ及び周囲気体圧力の影響)

Observation of Deformation of Single Droplet Impact on Solid Surface
(Effects of Liquid Properties, Surface Roughness and Surrounding Gas Pressure)

櫻井 泰 貴** 小林 一 道** 藤 川 俊 秀***
SAKURAI Yasuki KOBAYASHI Kazumichi FUJIKAWA Toshihide

真 田 俊 之† 渡 部 正 夫**
SANADA Toshiyuki WATANABE Masao

Abstract In the cleaning processes of manufacturing semiconductor devices, two-fluid spray cleaning technique is widely used; however, the detailed cleaning mechanism has not been clarified yet. In this study, we focus our attention to the elementary process of this cleaning technique, i.e. a single droplet impact on a solid surface. We experimentally observe impact of single droplet on a rigid solid surface with the use of high-speed photography, and we discuss the deformation of the droplet. Especially we focus on the effects of surfaces tension, surface roughness and surrounding pressure. Water droplets always create lamella during spreading after the impact on a smooth surface in the atmospheric pressure condition. Either decrease of the surface tension or increase of the surface roughness causes droplet splash. However, decrease of the surrounding gas pressure makes droplets always create lamella even in the cases with low surface tension and rough surfaces.

Keywords: Cleaning, Droplet impact, Splash, Lamella, Surrounding pressure

1. 緒 言

近年、半導体デバイス製造洗浄工程は、デバイスの微細化や使用する材料の複雑化によって、従来行われていたバッチ洗浄（大量一括洗浄）から枚葉洗浄（半導体ウェハ一枚ずつの洗浄）へと変遷してきた[1,2]。その枚葉洗浄においては、二流体ジェット洗浄と呼ばれる[3]、高速な気流に液体を混合し、微細液滴を高速で衝突させ表面を洗浄する技術が多く利用されている。著者らは、気体として水蒸気を使用し、水と混合することにより、表面洗浄を行う手法を開発した[4-6]。本手

法を用いると、空気に水を混合させる手法より、表面へより高い物理的作用を与えることが可能になる[7]。しかし、その詳細メカニズムは明らかではない。

水蒸気と水の混合噴流と空気と水の混合噴流の違いの1つに、前者が一成分系の二相流であることが挙げられる。そのため、水蒸気を用いることにより高い物理的作用が得られる理由として、筆者らは、水蒸気の凝縮効果が重要であると考えている。液滴が対象物に衝突する際には液滴固体面間の気膜が排除されねばならず、また、この気

* 2012.1.30 受付

** 北海道大学大学院工学研究院 機械宇宙工学部門 〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目
TEL: (011)706-6430 FAX: (011)706-7889 E-mail: masao.watanabe@eng.hokudai.ac.jp

*** 株式会社 オーバル

† 静岡大学工学部機械工学科

膜により液滴は大きな抵抗を受ける。気膜が凝縮性気体の場合には、対象物および液滴に凝縮することにより、排除される気膜体積が減少し、より高速のまま対象物に衝突するため大きな洗浄効果が得られると仮説をたてた[8]。また表面洗浄においては表面での液体のせん断応力が重要である。

液滴衝突後に半径方向に進展する液膜流れが形成される。本論文ではこの液膜部分を **lamella** と呼ぶ。液膜先端界面の不安定性が增大すると、進展液膜先端から微小液滴の飛散が観察される。本論文ではこれを **splash** の形成と定義する。**lamella** が対象物表面に沿って流れると強いせん断力が発生するが、**splash** が形成されると、液体が対象物表面に沿って流れないためせん断力が大きく減少してしまう[9]。凝縮の効果によって **splash** の形成が抑制され、液膜が対象物に沿って流れることが可能となり、大きなせん断力が維持されることも、洗浄効果が得られる要因のひとつであると考えている。**lamella** と **splash** の概念図[10,11]を Fig.1 に示す。なお、本論文では **splash** が形成されている場合であっても固体壁面に沿って進展する液膜の部分を **lamella** と呼ぶ。

Fig.1 Schematic of droplet impact and definitions of lamella and splash during droplet spreading after impact.

一方半導体デバイス洗浄工程においては、IPA（イソプロピルアルコール）が頻繁に使用される。表面張力の小さな IPA を二流体ジェット洗浄で

使用すると、水の場合と比較して表面への影響（洗浄効果、損傷等）に大きな違いがあることが報告されている[12]。また、半導体ウェハ表面には、液滴より遥かに小さなスケールのパターンが凹凸として存在する。この表面粗さにより液滴衝突後の液体流動は大きく変化するため、洗浄効果は固体表面粗さに大きく影響を受けると考えられる。本研究では、水蒸気-水混合噴流による表面洗浄手法の基礎メカニズムの仮説の検証、および上記物性値や固体表面粗さの洗浄効果に及ぼす影響を調査する一歩として、単一の液滴をアクリル平板へと衝突させその際の液滴の変形過程を観察する。液滴の物性値、特に表面張力の変化や固体表面粗さ、さらに液滴周囲気体圧力に着目し液滴衝突過程の観察を行う。特に、**lamella** や **splash** の形成条件に及ぼすこれらパラメータの影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および方法

2.1 実験方法

本実験では、容器内に液滴を発生させ、自由落下させることでアクリル板へと衝突させた。その際の衝突過程を高速度カメラを用いて撮影することで、液滴変形過程、すなわち **lamella** や **splash** の形成過程を観察した。

本研究では液滴の物性値として、特に表面張力に着目した。液滴の表面張力を変化させるため、純水およびエタノール、またエタノールと水の混合物を用いた。また、表面の微細な凹凸の影響を検討するために、平滑表面を有するアクリル板に加えて、アクリル板表面をサンドペーパー処理したものを用いた。さらに、液滴周囲気体圧力を制御し、大気圧および低気体圧力の条件で実験を行った。

2.2 実験装置

Fig.2 に実験装置の概要図を示す。実験容器は、真空容器となっており、真空ポンプ1（アルバック機工、GLD-201B）、同2（アルバック、PVD-180）を使用することで容器内の圧力を調整することができる。容器の寸法は 150 mm × 150 mm × 720 mm である。容器内の圧力は Baratron 圧力計（MKS、628D）を使用し計測した。

液滴発生のため、容器上部に注射針を設置し、ニードルバルブを調整することで液滴を発生させる。なお液滴発生を制御するため、液体容器上

部の圧力も真空ポンプで調整する。また液滴径の調整のため、3種類の注射針を使用した。それぞれ外径 1.2、0.7、0.4mm、内径 0.94、0.48、0.22mm である。

Fig. 2 Schematic of experimental setup.

2.3 実験条件

半導体プロセスで使用される液滴は、速度が数十から数百 m/s、液滴径が数十 μm 程度である [13, 14]。そのような液滴を直接観察するのは極めて困難が伴う。そのため本実験では、液滴径 $d_D = 1.8\text{mm} \sim 4.0\text{mm}$ の液滴を使用する。液滴衝突速度が $U_D = 3.2 \sim 4.2\text{ m/s}$ となるように液滴落下高さを調整し、液滴衝突で重要とされる無次元数である We 数 ($We = \rho U_D^2 d_D / \sigma$) を実機の条件と合わせた。本実験の無次元数の範囲は、 Re 数が ($Re = U_D d_D / \nu$, ν は気体の動粘度) 1500-8000 程度、 We 数が 300-700 程度である。

液滴の衝突過程観察は、高速度ビデオカメラ (Phantom V4.2, Vision Research) を用いた。撮影条件は、フレームレート 15963 fps、露光時間 2 μs 、空間解像度 $256 \times 112\text{ pixels}$ である。

使用した液滴の表面張力は表面張力計 (協和界面科学、CBVP-A2) を使用し計測した。水、エタ

ノールおよび水/エタノール混合液を使用し、それぞれ、W、Et、Et100 (例えば、20% の場合には Et20) と呼ぶ。水/エタノール混合液は、体積割合でエタノール 10%、20%、30%、50%、70% の混合比を用いた。それぞれの物性値、密度、表面張力および粘性係数を Table 1 に示す。

Table 1 Fluid properties.

Liquid	W	Et10	Et20	Et30	Et50	Et70	Et
ρ [kgm^{-3}]	998	977	956	935	894	852	789
σ [mN/m]	72.9	51.7	40.7	35.8	29.5	27.0	22.3
μ [$\text{mPa}\cdot\text{s}$]	1.00	2.85	2.90	2.84	2.67	2.61	1.2

Fig. 3 Microscope images of acrylic resin surfaces, (a) smooth surface, (b) rough surface (sand paper #120). Scale bar is 500 μm long.

Fig. 4 Roughness of acrylic resin surface, (a) smooth surface, (b) rough surface (sand paper #120).

ノール板の表面粗さを Fig. 3 に示す。表面粗さを変化させるため、#120 のサンドペーパー処理を行った。以後、処理をしない平滑なものを smooth surface、処理をしたものを rough surface と呼ぶ。rough surface の表面粗さは、表面粗さ計 (Mitutoyo, SJ-210) で測定した。測定の一例を

Fig. 4 に示すが、smooth surface はほぼ平滑で表面粗さも $Ra = 0.02 \mu\text{m}$ 程度であるのに対し、rough surface は、 $Ra = 1.0 \mu\text{m}$ 程度であった。アクリル板と液滴の接触角は、本実験範囲の表面粗さにおいて差異は無く、いずれの場合も 72.9° であった。なお、本実験条件の範囲では液滴衝突過程において、接触角の影響は小さいことが報告されている [15]。

液滴周囲の圧力は、大気圧および減圧状態によって行った。減圧状態で使用した圧力 p_s は、3.0kPa 程度、および lamella / splash 遷移領域を調査する実験では 30~50 kPa の条件で行った。

Fig. 5 Typical experimental results, (a) water $d_D = 4.0 \text{ mm}$, $U_D = 3.2 \text{ m/s}$, $We = 561$, (b) ethanol (100%) $d_D = 2.7 \text{ mm}$, $U_D = 3.1 \text{ m/s}$, $We = 918$.

3. 実験結果および考察

大気圧中における、典型的な液滴の変形過程を Fig. 5 に示す。図は、水の場合とエタノールの場

合の衝突結果を示している。液滴が固体表面に衝突後、いずれの場合も、衝突部分が周方向へと広がる。このとき、水の場合には lamella のみが形成されている。一方エタノールの場合、液膜は壁面に沿わず lamella と splash が形成されていることが分かる。本実験範囲において、大気圧で smooth surface を用いた実験では、水の場合全ての条件において lamella のみが形成された。

これまで、液滴がどの程度水平方向へ広がるか、 We 数が代表的な指標になるとされてきたが、Sikalo ら [15] は、lamella と splash の形成には表面張力および表面粗さが強く影響することを示した。彼らの実験結果においては、 $We = 1080$ の水液滴衝突の場合には splash が形成されないが、 $We = 300$ のエタノール液滴衝突の場合には splash が形成される。さらに表面を粗くした場合、 $We = 390$ という低い We 数においても splash が形成されると報告されている。Fig. 5 では、水の場合 lamella のみが形成され、表面張力の低いエタノールでは splash が形成されることが示されており、Sikalo ら [15] の結果と一致する。以下 lamella や splash の形成条件に関して、表面張力、表面粗さ、および周囲圧力の影響を調査する。

Fig. 6 Effect of surface tension for spreading of droplet, (a) Et10, $We = 426$, (b) Et20, $We = 506$, (c) Et30, $We = 477$, (d) Et50, $We = 491$.

3.1 液体表面張力の影響

Fig. 6 に、水とエタノールを混合させた場合の液滴衝突後の液滴変形の様子が、混合比によって異なることを示す。図は無次元時間で $t^* (= t U_D / d_D) = 0.5$ の時刻付近の結果を示している。実験は大気圧下で行った。Fig. 6(a) の Et10 ($\sigma = 51.7 \text{ mN/m}$) の場合でも、図では確認し難いが、lamella 先端から微小液滴が飛散しており、splash の形成が認

められた。この時の We 数は 426 である。さらに表面張力の減少に伴って splash の形成は顕著となった (Fig. 6(b)-(d))。なお表面張力の減少に伴い We 数は増加していたが、前述したように、水の場合 We 数が 1080 であっても lamella のみが形成される[15]。以上のことから、splash 形成においては、 We 数という無次元数では整理できないことがわかる。

そこで、水液滴とエタノール液滴を用い、落下速度と液滴径を調整し、 $We=610$ 程度の条件下で表面張力が異なる場合の液滴衝突後の液滴変形の様子を観察した。結果を Fig. 7 に示す。水とエタノールの物性値を比較すると (Table 1)、特に表面張力の差が顕著であるため、 We 数という無次元数としてではなく、表面張力の値そのものの差異が液滴衝突後の液滴変形においては、重要な役割を果たしていると予想される。

Fig. 7 Effect of surface tension, (a) water $d_D = 2.5$ mm, $U_D = 4.2$ m/s, $We = 607$, (b) ethanol (100%) $d_D = 1.8$ mm, $U_D = 3.1$ m/s, $We = 612$.

Fig. 8 Droplet spread factor as a function of dimensionless time.

Fig. 9 Definition of d_{lam} , (a) $t^* = 0.6$, $d_{lam}/d_D = 2.4$, (b) $t^* = 2.8$, $d_{lam}/d_D = 3.9$.

Fig. 8 に、水とエタノール混合液滴衝突後の変形過程を示す。図は Droplet spread factor[16]と呼ばれる、lamella の長さ d_{lam} を初期液滴直径 d_D で割った量 $\xi = d_{lam} / d_D$ (記号の定義は Fig. 1 を参照) の無次元時間 t^* の変化を示している。 d_{lam} は Fig. 9 のように定義し、splash が形成されている場合は、三相界面を lamella の先端とした。初期の変形 ($t^* < 0.3$) は Kim ら[17]のモデルを用いて van Dam ら[18]によって式(1)で表されることが報告されているが、本実験結果とは大きく異なっている。なお本実験結果は、 $t^* < 1$ の範囲内で $\xi = 3t^{*0.5}$ によって良く近似される。

$$\xi = \sqrt{1 - \frac{1}{16} \left(1 - 3t^* + 3\sqrt{t^{*2} - \frac{10}{3}t^* + 1} \right)^2} \quad (1)$$

$t^* > 1$ の範囲では、表面張力の違いによって、最大変形量が異なっている。今回の結果では、Et10 の場合が最も変形し、Et50 の場合に最も変形量が少なかった。この液滴の最大変形量は、多く予測式が報告されており、いずれも衝突直前の運動エネルギーが液滴の表面エネルギーへと変換される過程をモデル化している。複数のモデル

は、Bennett ら[16]によって整理され、その粘性散逸の違いにより、表面張力領域と粘性散逸領域へ分けられている。本研究範囲は Re 数が 1500-8000 程度、 We 数が 300-700 程度であるため、Bennett ら[16]の整理に従うと粘性散逸領域にあたる。

Bennett らの予測式は表面張力の効果を見逃した Jones の式 (2) と粘性散逸を見逃した Collings らの式 (3) を修正することにより作られた式で、式 (4) で表される[16]。本研究で ξ がほぼ一定値を示した $t^* = 3$ においての ξ とこれらの予測式の比較を Table 2 に示す。Jones の式 (2) が最も近い値を示したがやや小さく見積もっており、Collings らの式 (3) が最も過大評価、次に修正を行っている Bennett らの式 (4) も過大評価となっている。しかし、いずれの結果も式 (2) と式 (3) の間に値が入っており、Bennett らの予測式を修正すればより正確に最大変形量を予測することが可能だと考えられる。

$$\xi = \left(\frac{4}{3}Re^{\frac{1}{4}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\xi = \left(\frac{We}{6}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\xi = C_v \xi_v = C_v 1.2941 Re^{\frac{1}{5}} \quad (4)$$

$$\text{ここで } Re = \left(\frac{(We/3(1 - C_v^5) + 4)^{0.5}}{1.2941 C_v}\right)^5.$$

Table 2 Degree of flattening.

Liquid	Et10	Et20	Et30	Et50	Et70	Et
ξ	4.32	3.98	3.76	3.65	3.75	3.91
Eq.(2)	3.06	3.02	2.97	2.95	2.94	3.22
Eq.(3)	8.42	9.18	8.92	9.04	9.24	10.10
Eq.(4)	5.86	5.81	5.66	5.59	5.57	6.41

3.2 表面粗さの影響

Fig. 10 に、粗い表面に衝突した液滴の衝突後の変形過程を示す。Fig. 10 は、水液滴を rough surface へ落下させた結果であり、 We 数は 561 である。図に示すように、比較的低い We 数であり、高い表面張力を有する水であるにもかかわらず、

splash の形成が観察された。これは、従来の報告[15]と同じ傾向を示しており、splash 形成と表面粗さとの間に強い相関があることを示している。なお、本実験では、この rough surface を用いた実験以外、水液滴衝突において splash 形成は観察されなかった。

多くの研究が、液滴衝突における表面粗さの影響を調査しているが、その理由を明確に説明できていない[19]。液滴衝突後、液膜が広がる際には、固体壁面との間に境界層が発達する。また液滴が広がるにつれて液膜は薄くなる。さらに、液膜と周囲気体との間にはせん断力が働く。これらの要素が複合的に働き、splash が形成されることが予想される。さらに近年、この周囲気体の圧力の影響がこの液滴衝突後の現象に影響を及ぼすことが報告されている[20]。次節では、この周囲圧力が及ぼす splash 形成への影響について議論を行う。

Fig. 10 Effect of surface roughness for spreading of droplet, rough surface, $d_D = 4.0$ mm, $U_D = 3.3$ m/s, $We = 561$, $\Delta t = 127$ μ s.

3.3 周囲気体圧力の影響

Xu ら[20]は、液滴衝突の際の周囲気体圧力の影響を調査し、周囲圧力の減少に伴い、splash の発生が抑制されることを報告している。一方でこの現象を再現した実験は少なく、周囲気体圧力の影響は未だ議論の最中である。

Fig. 11 に周囲圧力を変更しエタノール液滴衝突後の挙動を観察した結果を示す。Fig. 5 や Fig. 6 で示したように、表面張力の低いエタノールは、 We 数が小さくても splash が形成される。一方圧力を 30 kPa 程度とした Fig. 11 (a)では、splash の形成が抑制され、lamella のみが形成された。これは、Xu ら[20]の実験結果を支持する結果である。その後、圧力を 40 kPa 程度とした Fig. 11 (b)では、lamella の先端に微細な乱れが発生し、圧力が 40 kPa 程度を超した Fig. 11 (c)や Fig. 11 (d)では、わずかであるが液滴が飛散しており、splash の初生

であることがわかる。このように、本実験においては、周囲圧力 40 kPa 程度で lamella のみの液膜流れから splash を伴った lamella の液膜流れへの遷移が観察された。

Fig. 11 Effect of surrounding pressure for spreading of droplet, (a) 30.2 kPa, $We = 773$, (b) 39.8 kPa, $We = 678$, (c) 42.1 kPa, $We = 701$, (d) 50.0 kPa, $We = 634$.

Fig. 12 Effects of surface roughness and surround gas pressure for spreading of droplet, (a) Et, smooth surface, $d_D = 1.8$ mm, $U_D = 3.3$ m/s, $We = 694$, (b) Et, rough surface, $d_D = 1.8$ mm, $U_D = 3.4$ m/s, $We = 736$.

本実験により、減圧下で splash の形成が抑制されることを再確認した。大気圧下では粗い固体表面は splash の形成を促進することが知られているが、減圧下において表面粗さが splash 形成に及ぼす影響は、これまでほとんど報告されていない。Fig. 12 に減圧下 (4 kPa) で smooth surface および rough surface へエタノール液滴を衝突させた結果を示す。Fig. 11 で示したように、smooth surface に衝突した場合には (Fig. 12 (a))、表面張力の低いエタノール液滴でも lamella のみが形成される。注目すべきは Fig. 12 (b)に示す rough surface の場合である。図に示すように、Fig. 12 (a) とほぼ同じ変形過程となり、splash の形成されやすい rough surface の場合であっても、本実験範囲内においては lamella のみが形成されることが確認された。

以上の結果より、rough surface であっても、周囲気体圧力を減圧することで splash の形成が抑制され lamella のみが観察されることが明らかとなった。今後、水蒸気凝縮効果を調査するため、蒸気雰囲気中で液滴や対象物の温度を制御して同様の実験を行う予定である。また、表面へ付着させた粒子の除去性能とこれらの物理現象の関連を調査することで、洗浄機構の解明を行いたい。

4. 結論

本研究では、水、エタノール、水/エタノール混合液の液滴を、異なる表面粗さを有する固体表面へ自由落下させ、その変形過程を観察した。また、周囲気体圧力を変更し、その影響を調査した。その結果、従来の実験で観察されているように、 We 数が数百の液滴は、水の場合に lamella のみが観察され、表面張力の低いエタノールでは splash の形成が観察された。水/エタノール混合液の液滴では、Et10 ($\sigma = 51.7$ mN/m) の場合に lamella 先端から微小液滴が飛散し、splash の形成が観察された。エタノール割合が多くなると、表面張力が減少し、splash の形成が顕著となった。また、smooth surface で lamella のみが観察された条件であっても、固体表面の表面が粗い場合には splash の形成が観察された。

周囲気体圧力を減圧すると、大気圧下で splash の形成が観察されていた条件であっても、lamella のみが観察されるようになった。splash が観察される境界は、40 kPa 程度であった。さらに、rough

surface であっても減圧下の条件では lamella のみが形成されることを明らかにした。

謝 辞

本研究の一部は、科学技術研究費（基盤 B 22360073）によって行われた。ここに記して感謝の意を表する。

Nomenclature

C_v	: coefficient for Eq.(4)	[-]
d_D	: droplet diameter	[m]
d_{lam}	: lamella diameter	[m]
Re	: Reynolds number	[-]
t^*	: dimensionless time	[-]
t	: time	[s]
U_D	: impact velocity	[m/s]
We	: Weber number	[-]

Greek letters

σ	: surface tension	[N/m]
ρ	: density	[kg/m ³]
μ	: viscosity	[Pa s]
ξ	: droplet spreading factor	[-]

参考文献

- [1] Hattori, T., Use of Multiphase Flows in Leading-Edge Semiconductor-Surface Cleaning, *Jpn. J. Multiphase Flow*, Vol. 24(1), 13–20 (2010).
- [2] Hattori, T., Non-Aqueous/Dry Cleaning Technology without Causing Damage to Fragile Nano-Structures, *ECS Trans.*, Vol. 25(5), 3–14 (2009).
- [3] Kanno, I., Yokoi, N. and Sato, K., Wafer Cleaning by Water and Gas Mixture with High Velocity, *ECS Proc.*, PV97-35, 54–61(1998).
- [4] Sanada, T., Saito, T., Hayashida, A., Saito, T., Yamase, M. and Watanabe, M., Development of Cleaning Technique by Using Spray Mixed with Steam and Water, *J. Jet Flow Eng.*, Vol. 24(3), 4–10 (2007).
- [5] Watanabe, M., Sanada, T., Hayashida, A. and Isago, Y., Cleaning Technique Using High-Speed Steam-Water Mixed Spray, *Solid State Phenom.*, Vol. 145-146, 43–46 (2009).
- [6] Mashiko, T., Sanada, T., Hashimoto, K., Horibe, H., Hayashida, A. and Watanabe, M., Experimental Estimate of Physical Actions of Steam-Water Mixed Spray, *Jpn. J. Multiphase Flow*, Vol. 24(5), 703–709 (2010).
- [7] Sanada, T., Watanabe, M., Shiota, M., Yamase, M. and Saito, T., Impact of High-Speed Steam-Droplet Spray on Solid Surface, *Fluid Dyn. Res.*, Vol. 40, 627–636 (2008).
- [8] Sanada, T., Watanabe, M., Mashiko, T., Hayashida, A. and Komano, H., Chemical-free Cleaning Process, Steam and Water Mixed Spray, *J. Jpn. Air Cleaning Assoc.*, Vol. 47(5), 31–36 (2010).
- [9] Fujikawa, T., Tatekura, Y., Kobayashi, K., Sanada, T., Hayashida, A. and Watanabe, M., High-Speed Droplet Impact as an Elementary Process of Physical Cleaning, *ECS Trans.*, Vol. 41, 67–74 (2011).
- [10] Rein, M., Phenomena of Liquid Drop Impact on Solid and Liquid Surfaces, *Fluid Dyn. Res.*, Vol. 12, 61–93 (1993).
- [11] Yarin, A. L., Drop Impact Dynamics: Splashing, Spreading, Receding, Bouncing..., *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 38, 159–192 (2006).
- [12] Kanno, I., High-Velocity-Aerosol Cleaning in Semiconductor Manufacture, *JSAT Journal*, Vol. 55(11), 636–639 (2011).
- [13] Xu, K., Pichler, S., Wostyn, K., Cado, G., Springer, C., Gale, G., Dalmer, M., Mertens, P. W., Bearda, T., Gaulhofer, E. and Podelesnik, D., Removal of Nano-Particles by Aerosol Spray, *Solid State Phenom.*, Vol. 145–146, 31–34 (2009).
- [14] Sato, M., Sotoku, K., Yamaguchi, K., Tanaka, T., Kobayashi, M. and Nadahara, S., Analysis on Threshold Energy of Particle Removal in Spray Cleaning Technology, *ECS Trans.*, Vol. 41(5), 75–82 (2011).
- [15] Šikaloo, Š., Marengo, M., Tropea, C. and Ganić, E. N., Analysis of Impact of Droplets on Horizontal Surfaces, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 25(7), 503–510 (2002).
- [16] Bennett, T. and Poulikakos, D., Splat-Quench Solidification: Estimating the Maximum Spreading of a Droplet Impacting a Solid Surface, *J. Material Science*, Vol. 29, 963–970 (1993).
- [17] Kim, H. Y., Feng, Z. C. and Chun, J. H., Instability of a Liquid Jet Emerging from a Droplet upon Collision with a Solid Surface, *Phys. Fluids*, Vol. 12(3), 531–541 (2000).
- [18] van Dam, D. B. and Christophe, L. C., Experimental Study of the Impact of an Ink-Jet Printed Droplet on a Solid Substrate, *Phys. Fluids*, Vol. 16(9), 3403–3414 (2004).
- [19] Range, K. and Feuillebois, F., Influence of Surface Roughness on Liquid Drop Impact, *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 203, 16–30 (1998).
- [20] Xu, L., Zhang, W. W. and Nagel, S. R., Drop Splashing on a Dry Smooth Surface, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 94, 184505 (2005).