

新興国の大気環境改善のための液滴微粒化コントロールに向けた 微細構造加工の設計・手法

東海大学 機械システム工学科 教授 落合 成行
東海大学 総合科学技術研究所 研究員 野原 徹雄
(2019年度 一般研究開発助成 AF-2019215-B2)

キーワード：表面微細構造，液滴微粒化制御，低出力レーザ加工，バイオミメティクス，尿素 SCR システム

1. 研究の目的と背景

経済発展の著しい新興国ではインフラ整備や農業開発が加速する中，それらに必要なトラックや建設機械，農耕機などは乗用車のような電動化が困難とされている．そのため，それらの動力源であるディーゼルエンジンのカーボンニュートラル化として近年はバイオ燃料や e-fuel（大気中や工場で排出された CO₂ と再生可能エネルギーにて水から生成された水素の合成液体燃料）等の代替燃料による研究開発も加速している．しかし，代替燃料を使用しても排ガス中には NO_x（窒素酸化物）と呼ばれる光化学スモッグや酸性雨を引き起こす有害物質は含まれており，大幅な排出低減が求められている．これらに対応するための排ガス後処理装置として NO_x を発生させて NO_x 浄化率の高い尿素 SCR（選択還元触媒）システムの搭載が注目されている¹⁾．

尿素 SCR システムは噴霧された尿素水をミキサーと呼ばれる特殊プレート壁面に衝突→微粒化→気化を経て NH₃（アンモニア）に変化させ，排ガス中の NO_x と反応後に無害な水と窒素に変換させている．しかし，始動時や低速走行時における低温域では，噴霧された尿素水がミキサー衝突部の蒸気膜により熱伝達が阻害されるライデンフロスト現象²⁾により尿素水が微粒化せず気化にかかる時間も増加し浄化率が低下する問題が起きている．

そこで本研究では，これまで筆者らが研究してきた軸受などの摩擦低減を目的にしたディンプルや突起などの微細構造を施す表面微細加工³⁾をライデンフロスト現象が起こる加熱壁面へ施し，衝突液滴の新たな微粒化手法として提案した．排気管内やミキサーの材料片へ，超撥水性の蓮の葉や水分吸収が高いサボテンのとげ等を参考にしたバイオミメティクス(生体模倣)表面微細加工にて液滴微粒化最適デザインを用い，液滴の微粒化制御を促進させた．また，それらの様々な微粒化促進デザインを精度良く加工可能にする新たな印字・微細加工をレーザーマーカー加工機に 2D データ入力するだけで試験材表面へ具現化出来る手法も確立した．

2. 実験方法

2.1 バイオミメティクス表面微細加工について

図1に尿素 SCR システムおよび液滴衝突・微粒化の模式

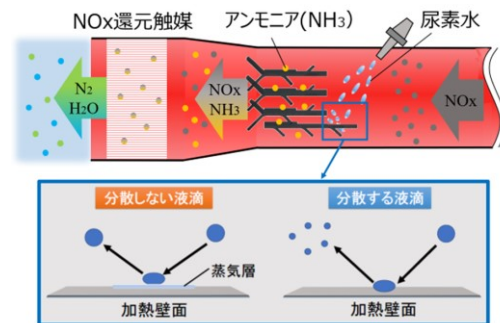


図1 尿素 SCR システムおよび液滴衝突・微粒化

図を示す．既存のミキサープレートは未加工の金属プレートに液滴を衝突させているため，ライデンフロスト現象下における蒸気層が発生し加熱壁面の熱が衝突液滴に伝わり難く表面張力が優勢になり跳ね返ってしまう．この衝突壁面の特性を変えることにより液滴を微粒化させる新たな手法として規則的な微細構造を施した表面微細加工を筆者らは検討している³⁾．しかしライデンフロスト現象下における表面微細加工の適用事例として，液滴径 2~3 mm と大きい核沸騰時における微粒化現象は可視化されているものの⁴⁾，尿素水を衝突させて 20μm 以下のレベルに分散させるような微粒化制御は他に例が無い．そこで自然界にある植物や生物が有する表面微細構造を参考にしたバイオミメティクス技術を応用し，液滴衝突時の微粒化およびライデンフロスト現象の抑制を主眼に，図2のような様々な表面微細構造を創生している．

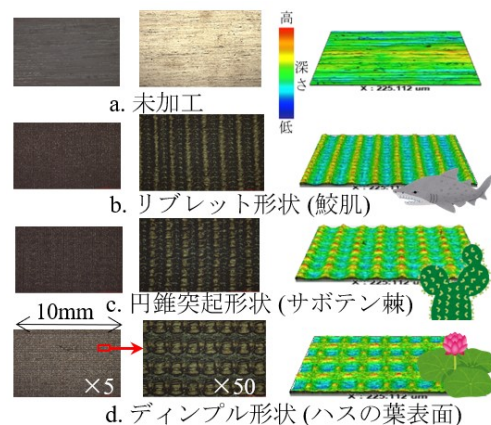


図2 バイオミメティクス表面微細加工例

2・2 レーザ加工による最適微粒化用ディンプル製作

噴霧液滴による液滴衝突時の微粒化およびライデンフロスト現象の抑制を主眼に、図 3 にあるような QR コード等を印字する低出力タイプの YVO₄ レーザ加工機を用いてミキサの材料と同材料 (SUS430) に様々な表面微細構造を創生している。

本研究では衝突液滴を微粒化させる事に特化した“蓮の葉表面”を模倣したディンプル表面微細加工を施した。これらの最適化デザインのために YVO₄ レーザ加工機の出力、印字回数やスキャンスピード、Q スイッチ周波数を検討し、ディンプルの穴径や深さ、加工時のデブリ抑制、溝部の粗さや溝部傾き精度向上にて低コストでのレーザ加工による新規形状の作製を可能とした (表 1)。それらの相関例を図 4 に表す。穴径 60 μ m 以下のディンプルの場合、1 ショット時のスポット径指示、レーザ出力および Q スイッチ周波数により 30~60 μ m 程度までは調整可能となる。しかし穴径 60 μ m 以上の場合は調整幅が鈍化してしまいスポット径の調整だけでは加工不可となる。そのため今回の実験評価でも使用した穴径 90 μ m のディンプル加工では加工図面を直径 30 μ m の円として作成しレーザスポット径の半径分を外側に照射する新たな手法を見出している。但し、今回の結果は測定時の使用機器・使用度合いや加工材料での条件のため、YVO₄ レーザ加工機の経年劣化による出力低下や、加工用ステージの傾き、加工中の振動、試験片表面硬さや粗さ、ディスタンスポイントの微妙なズレ、加工用 CAD 図面により変化することを考慮する必要がある。

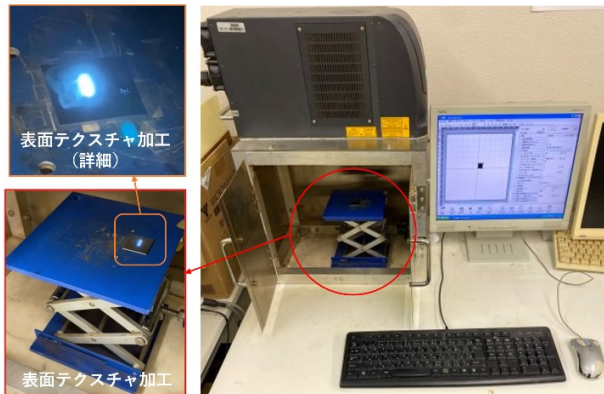


図 3 表面微細加工用 YVO₄ レーザ加工機

表 1 最適微粒化用ディンプル レーザ加工条件

穴径 [μ m]	深さ [μ m]	ピッチ [μ m]	レーザパワー [%]	スキャン スピード [mm/s]	周波数 [kHz]	印字 [回]
30	5	30	22	500	35	65
60	3	60	60			10
	5					16
	7					26
	10					37
	15					57
90	5	90	60			5
	10					8

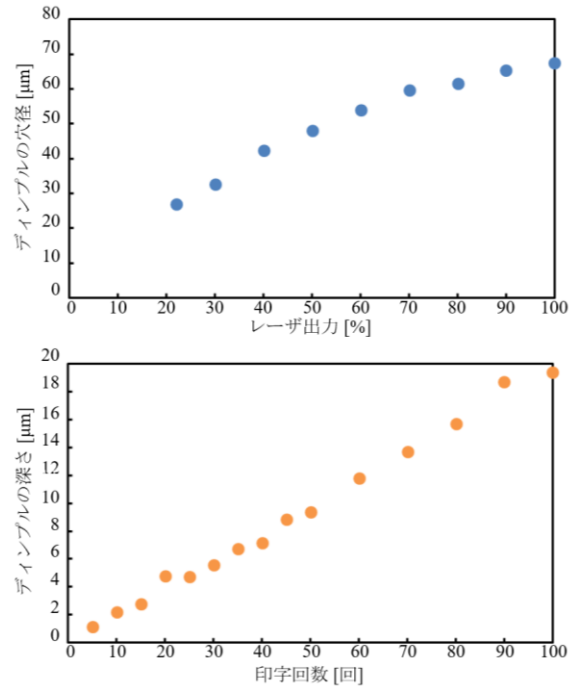


図 4 レーザ出力と穴径(上)/印字回数と深さの関係一例 (スキャンスピード 500mm/s, Q スイッチ周波数 35kHz)

2・3 実験装置および微粒化促進用ディンプル形状比較

新たなディンプル形状による微粒化促進・ライデンフロスト現象抑制を検証するため、加熱壁面への液滴衝突による液滴衝突実験を実施した。図 5 に実験装置概略を示す。単孔型インジェクタ&SCR ドージングシステム (Tenneco XNOxTMSCR) にて噴霧量を調整し、噴霧液滴をライデンフロスト現象の領域と言われる 270 $^{\circ}$ C までホットプレート上にて試験材を加熱し壁面に衝突させる。その際の衝突前後挙動をバックライト法で拡大計測用顕微鏡レンズを取り付けた高速度カメラと LED ライト (ナックイメージテクノロジー: HX-6 & L/L BK-55) を対角設置にて撮影した。実験条件として表 2 のように液滴径および衝突速度の数値解析用として条件 1 を、液滴挙動の詳細な画像評価用では衝突前液滴径を平均粒径に近い 70 μ m に固定した高時間分解能の条件 2 にて実施した。

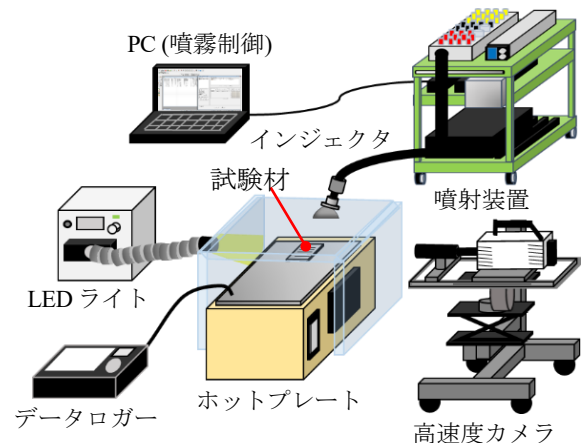


図 5 液滴衝突可視化実験 概略

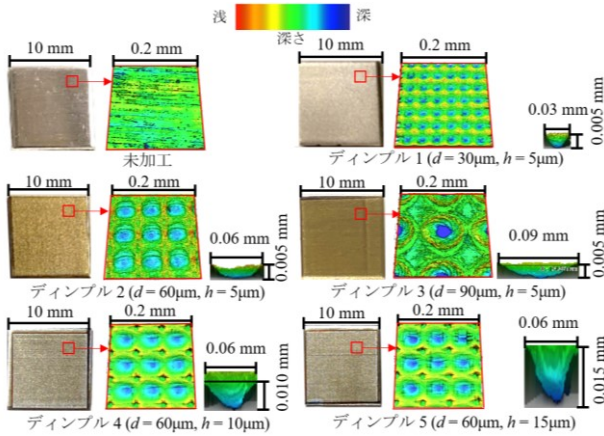


図 6 微粒化促進用ディンプル形状比較用試験材

図 6 に本実験に用いた各試験片の諸元、実画像と白色干渉顕微鏡による 3 次元画像を示す。テクスチャ形状には穴径および深さ違いのディンプルを施している。穴径 d は $30\ \mu\text{m}$, $60\ \mu\text{m}$, $90\ \mu\text{m}$, 深さ h は $5\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$, $15\ \mu\text{m}$ とし、各形状をそれぞれディンプル 1 から 5 と定義した。材料には、ミキサーと同様の SUS430 を選定し、テクスチャの加工には YVO₄ レーザ加工機 (KEYENCE : MD-V9900) を使用した。これらの試験材および実験装置を使用した実験条件を表 2 に示す。また、実際の車両では尿素水を使用しているが、本実験条件では尿素析出による固着や表面微細加工部への目詰まりが発生する可能性があるため、先行研究でも使用されている模擬性の高い精製水を用いた⁵⁾。

3. 実験結果および考察

3・1 臨界ウェーバ数による微粒化効果の評価・数値化

壁面衝突後における液滴挙動の評価・数値化として、慣性力と表面張力の比を表す無次元数であるウェーバ数 We にて微粒化度合いを確認した⁵⁾。ウェーバ数 We は液滴径 D_p [m], 液滴の衝突速度 V [m/s], 液滴の密度 ρ [kg/m³], 液滴の表面張力 σ [N/m] より次式で表される。

$$We = \frac{D_p V^2 \rho}{\sigma} \quad (1)$$

図 7 に条件 1 での代表的な液滴挙動の可視化結果を示す。同図のような可視化結果を基に壁面衝突前の焦点液滴を無作為に 200 粒抽出し、Image J (画像解析ソフト) と FlowExpert 2D (Particle Image Velocimetry : 粒子画像流速測定法) を用いて測定した液滴径と衝突速度を式 (1) に代入することで、各試験材における微粒化に必要な各液滴のウェーバ数を算出した。本実験では顕微鏡レンズを用いた拡大撮影を行っており、可視化位置によっては液滴同士の合一が起こる。そのため、誤計測の要因となる合一液滴や非焦点液滴は手作業による解析で除外した。また噴霧液滴の温度を 20°C , 液滴密度 ρ を $998.2\ \text{kg/m}^3$, 表面張力 σ を $72.8\ \text{mN/m}$ とした。

図 8 に各試験材での衝突前における液滴径および速度の関係を示した実験結果を示す。丸橙色のプロットは衝

表 2 実験条件

	条件 1	条件 2
噴霧液	精製水	
噴霧圧	540 kPa	
噴霧量	0.16 g/s	
噴霧角	65 degree	
噴霧液滴径	63.5 μm	
噴霧液滴温度	20 ° C (室温)	
撮影用衝突前液滴径	40~120 μm	70 μm
試験材温度	270 ° C	
試験材材質	SUS430	
撮影速度	30,000 fps	150,000 fps
露光時間	2 μs	
空間分解能	5.5 μm / pixel	
撮影手法	バックライト法	

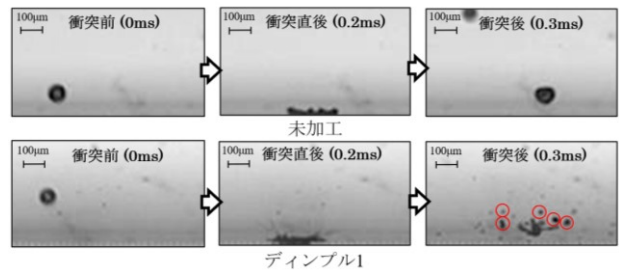


図 7 臨界ウェーバ数算定用可視化撮影判定例 (撮影速度 30,000fps, 試験材温度 270°C)

突後 2 粒以上に微粒化した液滴を、菱青色のプロットは衝突後に微粒化しなかった液滴を示す。衝突後に微粒化しなかった液滴において、図 8 に実線で示したウェーバ数が最大となるプロットを臨界ウェーバ数 We_c と定義し、各試験材における微粒化効果を比較する指標とした。一般的に低ウェーバ数 (小液滴径且つ低速度) の液滴は微粒化しにくくなることから、ディンプルを施した試験材の臨界ウェーバ数が未加工よりも低ければ、ディンプルによる微粒化効果が高いと言える。図 8 より、未加工では $We_c = 91.8$ であるのに対しディンプルでは全ての場合で大幅にそれを下回っており、ディンプルによる微粒化促進効果が確認された。またディンプル穴径違いではディンプル 3 ($d=90\ \mu\text{m}$, $h=5\ \mu\text{m}$, $We_c=1.2$) が、ディンプル深さ違いではディンプル 4 ($d=60\ \mu\text{m}$, $h=10\ \mu\text{m}$, $We_c=0.9$) が最も臨界ウェーバ数が低下しており、衝突前の噴霧液滴径が $40\sim 120\ \mu\text{m}$ という一般的によく見られる条件下において、ディンプル形状の穴径と深さによる最適微粒化制御の手法を提示することが出来た。

3・2 高時間分解能による液滴衝突前後の詳細確認

次に、ディンプル形状による低臨界ウェーバ数での微粒化効果が得られた理由について、高時間分解能での可視化結果から考察を行った。衝突前における大粒径の液滴は慣性力が大きく衝突による微粒化が顕著なため、ディンプルによる微粒化効果の評価に適していない。そのため、衝突前の液滴径を $70\ \mu\text{m}$ に統一し比較を行った。

図 9 にその観察結果を示す。未加工では衝突後に微粒化せずに跳ね返るのに対し、ディンプル形状ではディンプル 1 を除いて、衝突後わずか $7\ \mu\text{s}$ にて大きな変形や上

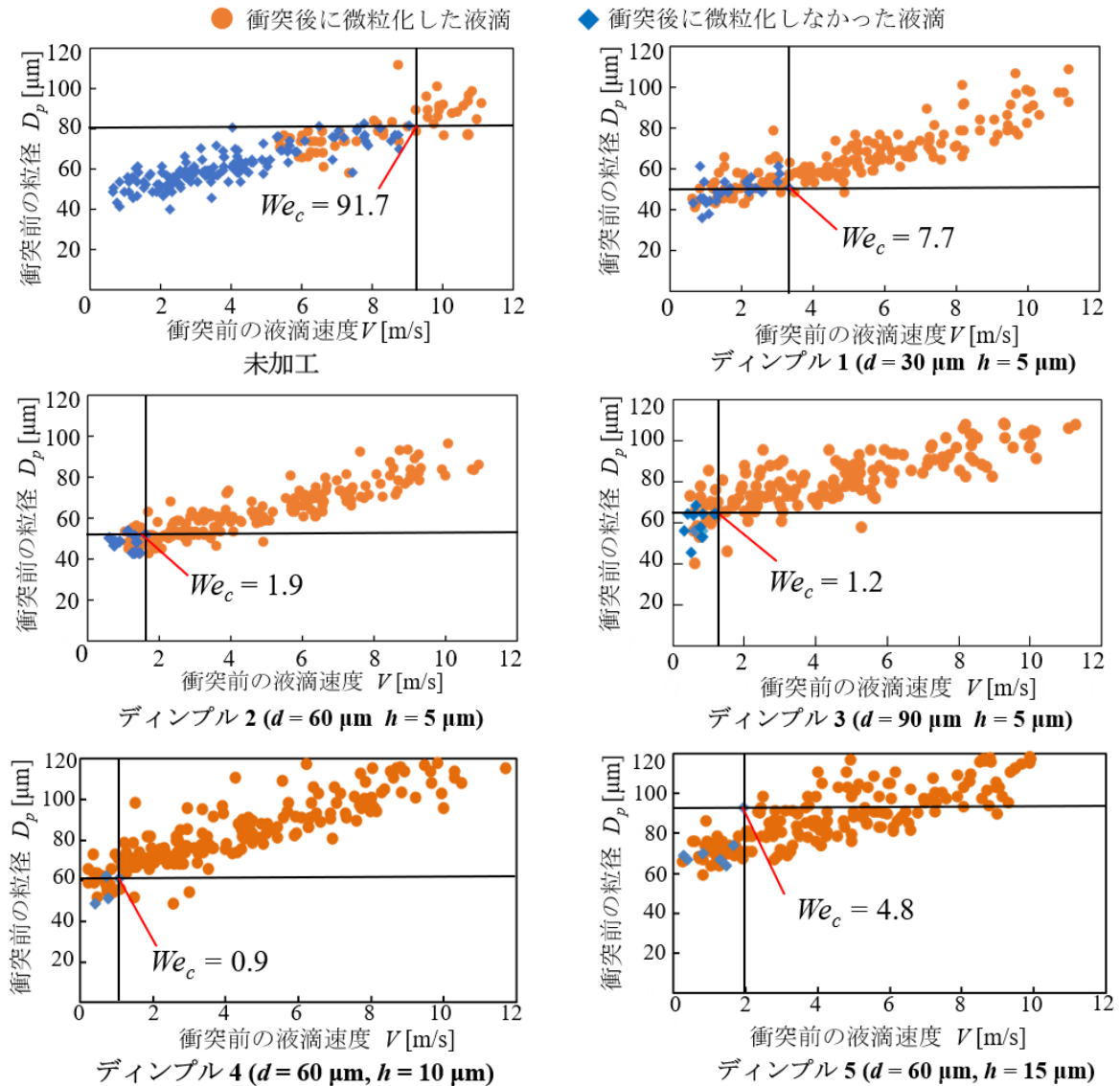


図 8 高速度カメラ撮影結果を基にした臨界ウェーバ数によるダインプル径・深さ違いでの微粒化度合い数値化 (撮影速度 30,000fps, 試験材温度 270°C, 衝突前の液滴径 40~120μm)

部に噴き上がるような挙動を示し、細かな液滴が既に千切れていることがわかる。またダインプル穴径違いで比較すると、穴径の小さいダインプル 1 ($d=30\ \mu\text{m}$, $h=5\ \mu\text{m}$, $We_c=7.7$) は衝突時における噴き上がりはほぼ確認されず衝突後 21μs で初めて大きな変形および一部微粒化をしており、臨界ウェーバ数が他のダインプル形状に比べ大きくなる理由と推測される。一方、穴径が最も大きいダインプル 3 ($d=90\ \mu\text{m}$, $h=5\ \mu\text{m}$, $We_c=1.2$) ではダインプル 2 ($d=60\ \mu\text{m}$, $h=5\ \mu\text{m}$, $We_c=1.9$) よりも激しい噴き上がりが確認され大幅に微粒化が促進されていることがわかる。

次にダインプル深さ違いについて比較すると、深くなるほど噴き上がるような挙動が抑制されており、深さに比例して微粒化し難くなっていると言える。但しダインプル 2 ($d=60\ \mu\text{m}$, $h=5\ \mu\text{m}$, $We_c=1.9$) に比べ深さのある

ダインプル 3 ($d=60\ \mu\text{m}$, $h=10\ \mu\text{m}$, $We_c=1.9$) は衝突後 14~28μs で垂直側（上向き）に微粒化された微小粒径の液滴が移動しており、微粒化後の移動位置による液滴合一の抑制も推測されているのがわかる。

3・3 ダインプル形状による微粒化制御メカニズム推定

これまでの可視化実験による微粒化度合いの数値化や液滴挙動詳細観察の結果より、ダインプル形状による微粒化制御のメカニズムについて推定してみる。Fraser ら⁶⁾は液体の微粒化メカニズムについて効率的な微粒化には外力により液体を棒状もしくは膜状に変形させた上で流体力学的な不安定性により分裂させることが望ましいとしている。このことから、図 9 に示すようにダインプル壁面へ衝突した際に単位体積当たりの液滴と衝突壁面の接触表面積増加による液膜化が微粒化促進のきっかけになったと考えられる。またダインプルの様な凹凸部への

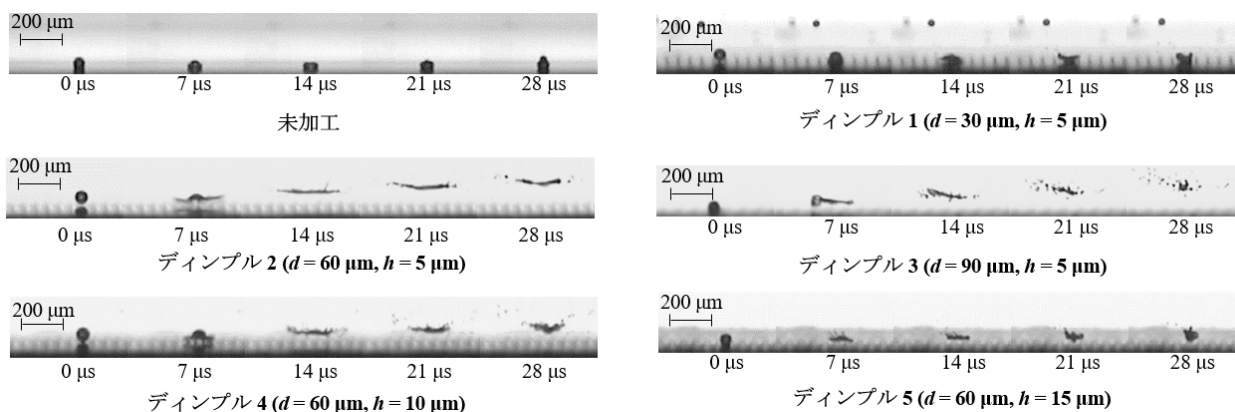


図9 高時間分解能での可視化結果によるディンプル径・深さ違いでの液滴微粒化・挙動の観察結果
(撮影速度 150,000fps, 試験材温度 270°C, 衝突前の液滴径 70μm)

衝突による液滴挙動への影響について、Hatakenaka ら⁷⁾は衝突壁面が粗面の場合に表面にみられる微細な凹凸に存在する沸騰核により生成された気泡が液滴衝突時に急成長し上方へ液滴を押し上げることで液膜状になることを予測している。そのため本研究におけるディンプル形状での微粒化促進についても類似した現象が生じていると考えられ、ディンプルに液滴が入り込んだ際の生成気泡により噴霧液滴が液膜化し、穴径が大きいほどディンプル部への衝突割合が向上することで噴き上がりによる微粒化を促進していると考えられる。一方、穴径および深さによって微粒化効果が変化した一つの要因として、ディンプルにおけるエアトラップが考えられる。諸貫ら⁸⁾は液滴とテクスチャ形状による濡れ性の変化を評価しており、深いもしくは小さい穴径ほどテクスチャに空気が残留しやすくなることで液滴の侵入が阻害されると考察している。そのため本研究におけるディンプルが深い、もしくはディンプル穴径が小さい形状での結果もエアトラップにより液滴の侵入が阻害された可能性も考えられる。これにより噴き上がる挙動が抑制されることで、液滴の表面張力を上回ることができず微粒化効果が低下した要因の一つとして挙げられる。但しある程度のディンプル深さにて垂直方向への微粒化吹き上がりも観察されており、ディンプル深さは浅過ぎず深すぎず、且つ噴霧液滴径よりも大きめのディンプル穴径を施すことが衝突液滴の微粒化に有効であると考えられる。

4. まとめ

本研究では新興国の大気改善を主眼とした尿素 SCR システムの新たな尿素水噴霧液滴の微粒化手法として、衝突壁面へ低出力レーザー加工機を使用したディンプル形状の最適化コントロールを確立した。高速度カメラを用いた微粒化評価の数値化および高時間分解能での可視化結果より液滴挙動を考察し、微粒化制御メカニズムを推定した。得られた知見を以下に示す。

(1) YVO₄ レーザ加工による低コストでの液滴微粒化に特

化した様々なディンプル新規形状の作製を可能とした。
(2) 臨界ウェーブ数による評価から、ディンプルの穴径および深さによる微粒化効果の違いを明らかにした。
(3) ディンプルを衝突壁面に施すことにより、未加工の状態よりも気化に有効な手法として確認した。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-2019215-B2) を受け実施されたものであり、ここに謝意を表します。また、本研究の遂行において共同した菊池飛鳥氏 (修士課程・当時) 及び杉山直輝氏 (博士課程) にも深く感謝致します。東海大学機械システム工学科 高橋俊准教授および同研究室の皆様、株式会社いすゞ中央研究所には液滴噴霧時の挙動解析にて多大なご協力とご助言を頂きました。最後に実験装置についてご協力頂きました株式会社ナックイメージテクノロジー 佐々木裕康氏、カトウ光研株式会社 小林賢之氏、テネコジャパン株式会社 鈴木伸幸氏に謹んでお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 前川 弘吉, 大角 和生, 藤田 哲也, 板垣 裕, 佐藤 薫, SCR 触媒の尿素分解過程が NO_x 浄化性能に及ぼす影響, 自動車技術会論文集, 2013 年 44 巻 2 号 p. 275-280, (2013)
- 2) Leidenfrost, J. G., De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus, Ovenius (1756).
- 3) 杉山直輝, 野原徹雄, 菊池飛鳥, 戸谷友輔, 落合成行, マクロ～メソ～ミクロスケールでの排ガス・液滴挙動の確認ー表面テクスチャ加工による微粒化メカニズムの検証ー, 自動車技術会論文集, 2020 年 51 巻, 1 号, (2020), 72.
- 4) Liang, G. and Mudawar, I., Review of drop impact on heated walls, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 106, (2017), 103.
- 5) 千田二郎, 山田耕司, 竹内貴一郎, 三木英雄: 高温壁面に衝突する液滴の変形および分裂挙動, 日本機

械学会論文集 (B 編), vol. 52, No. 481, p. 3372-3379 (1986)

- 6) Fraser, R. P., Eisenklam, P., Dombrowski, N., and Hasson, D. : Drop Formation from Rapidly Moving Liquid Sheets, A.I.Ch.E Journal, vol. 8, No. 5, p.672-680, (1962)
- 7) Hatakenaka, R., Breitenbach, J., Roisman, I. V., Tropea, C. and Tagawa, Y., Magic Carpet Breakup of a Drop Impacting

onto a Heated Surface in a Depressurized Environment, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 145, 118729 (2019).

- 8) 諸貫信行, 高山明典, 金子新 : 濡れ性制御のためのテクスチャ設計, 日本機械学会論文集 (B 編), vol. 70, No. 693, p.1244-1249 (2004)