

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月8日現在

機関番号：87104

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760145

研究課題名（和文） 超音速空気流れによる水滴の冷却と氷核生成

研究課題名（英文） Ice nucleation of water droplet in supersonic air streams

研究代表者

周善寺 清隆（SHUZENJI KIYOTAKA）

福岡県工業技術センター・機械電子研究所・研究員

研究者番号：00416504

研究成果の概要（和文）：微小な氷粒子および過冷却水滴を超音速で噴射するマイクロアイスジェットノズルの内部における水の微粒化と水滴の冷却及び氷核生成について調べた。位相レーザドップラー粒子分析計により水滴の粒径を測定した結果、ノズル内に供給された水はノズル近傍の領域において主に微粒化されていることがわかった。また、ノズル出口における粒子の状態相は水滴の粒径により異なり、直径5ミクロン以下の微小な水滴はノズル内で氷核が生成していることがわかった。

研究成果の概要（英文）：The process of the atomization of water and the ice nucleation of the droplet in Laval nozzle were investigated through the experiment with a phase Doppler particle analyzer and the unsteady thermal conductive analysis by the Heisler chart. The experimental results show that the droplet was atomized and accelerated primarily in the region of 60mm downstream from the throat. The profile of the axial velocity at the nozzle exit is similar to the shape of Hagen-Poiseuille flow which fully developed. The axial mean velocity and the arithmetic mean diameter were 473m/s and 5.6um respectively at the nozzle exit with the water flow rate of 10 mL/min. The thermal conductive analyses indicate that the droplet which diameter is smaller than 5 um freezes inside the nozzle regardless the relative velocity for the air streams.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：混相流、氷核生成

1. 研究開始当初の背景

半導体やガラス基板、精密機械部品の製造プロセスにおいて洗浄工程は重要性を増しており、半導体ではパターニングの微細化に伴って、サブミクロン以下の粒子状汚染物質を除去する

ことができ、かつ環境問題に配慮した低環境負荷対応の洗浄技術が必要とされている。こうした中で、薬液を使用しない物理洗浄として、純水を用いた気液二流体ノズルが開発され、従来のメガソニックスクラバや高圧ウォータージェットを

上回る洗浄性能を有することが確認されている。洗浄媒体を圧縮空気で加速する二流体ノズルの洗浄性能は噴霧速度に依存するため、付着力が大きい微小な粒子を除去するためには、噴射速度をできるだけ大きくすることが望ましく、噴射速度を超音速まで高めた洗浄ノズルも開発されている。

一方で、洗浄メディアとして氷に着目した研究開発も実施されており、液体窒素を使用して -100°C 以下に冷却した容器の中に、スプレーノズルから数十ミクロンの微細な水滴を噴霧し、熱交換させて氷粒子を作り、噴射用気体により加速して噴射するアイスブラスト洗浄装置が開発され、優れた洗浄能力が確認されている。しかし現状では、液体窒素を使用することにより設備コスト、ランニングコストが高くなることから使用される工程は限定されている。

2. 研究の目的

研究者らは圧縮空気と水を超音速ノズルに供給することで、球形かつミクロンサイズの微小な氷粒子および過冷却水滴を超音速で噴射するマイクロアイスジェット洗浄ノズルを考案した。本ノズルでは、圧縮空気の断熱膨張による空気温度の低下を利用して、特別な冷媒や製氷装置を用いることなくノズル内において過冷却水滴(0°C 以下においても凍結していない水滴)及び氷粒子を生成することができる。しかし、ノズル内部における微粒化及び水滴の冷却と氷核生成による相変化はミリ秒以下の時間スケールでの現象であり、その詳細は明らかになっていない。そこで本研究では、マイクロアイスジェットノズルの水滴の粒径と速度について位相レーザドップラー分析計により測定した。また、ノズル内において超音速空気流れとの直接熱交換により冷却される水滴の温度変化をハイサー線図により求め、水滴内で氷核が生成する条件について調べた。

3. 研究の方法

図1にマイクロアイスジェットノズルの出口における粒径および速度を計測するための実験装置を示す。コンプレッサにより圧縮された空気は、冷凍式エアドライヤにより除湿されタンクに貯気される。圧縮空気の供給圧力は減圧弁により設定圧力に調整され、バルブを開放することにより圧縮空気はノズルに導入される。位相レーザドップラー粒子分析計(PDA)はDantec社製高濃度対応HiDencePDAシステムを使用した。本分析計では、粒径と二方向の速度を非接触で同時計測が可能であり、測定体積が非常に小さいため空間分解能が高い。また、測定対象が水滴、氷粒子、いずれであっても、球状の粒子であれば計測することが可能である。光源としてはDPSSレーザを使用した。高精度の三軸トラバース装置によりPDAの光学系を移動させることで、粒径や速度の空間分布を調べることができる。

マイクロアイスジェットノズルにおける圧縮空気の流路は、コンバージェント部、スロート部、ダイバージェント部から構成されており、ラバルノズル形状となっている。ノズルに供給される圧縮空気の供給圧力は、一般的なコンプレッサの常用圧力の範囲を考慮して 0.6MPa に設定し、ノズル内部で圧縮空気が適切に断熱膨張するように、特性曲線法を用いて設計した。ノズルの材質は氷の壁面への付着を防止し、断熱効果に優れているテフロン樹脂(PTFE)を用いた。ノズルのスロート直径は 3mm 、スロートから出口までの長さは 150mm であり、圧縮空気流量は前記設定圧力において約 $530\text{NL}/\text{min}$ である。軸方向をZ、半径方向をRと定義し、ノズル出口端部の中心を基準点 $(Z,R)=(0,0)$ とした。実験に使用する水は蒸留水を用い、孔径 $0.2\mu\text{m}$ のメンブレンフィルタを通過させた後、マスフロコントローラにより設定流量に調整され、スロート部流路中央に設置されたニードルから供給される。水の流量は $3\sim 10\text{mL}/\text{min}$ とした。また、圧縮空気と水の供給温度は温度調整器により 25°C に調整している。

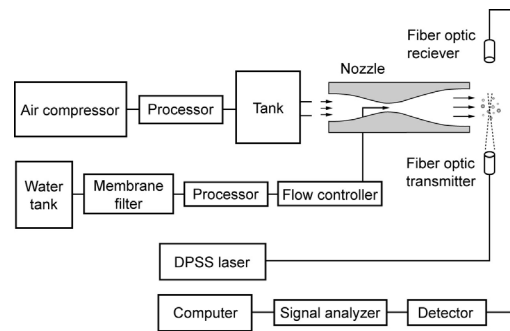


図1 噴霧速度計測システム

4. 研究成果

(1) マイクロアイスジェットノズルにおいては、ニードルから吐出された水は微粒化されて微小な水滴となり、超音速かつ低温の空気流れにより水滴は加速されると同時に直接熱交換により冷却される。水滴の挙動を調べるためには、ノズル内部において粒径及び速度の変化を計測することが不可欠であるが、ノズルをレーザ光が透過する材質で製作したとしても、屈折の影響により高精度な計測を行うことが難しい。そこで、スロート部からノズル出口までのダイバージェント部を出口側から切断し短くした形状のノズルを製作した。図2にスロート部から出口端部までの長さLが $20, 60, 100, 125, 150\text{mm}$ のノズルを用いた場合における軸方向平均速度について示した。速度の計測位置は $(Z,R)=(10,0)$ であり、水の供給流量 Q_w を $3, 5, 10\text{mL}/\text{min}$ に設定して実験を行った。計測結果より、 $L=20\sim 60\text{mm}$ において速度が急激に増加し、 $L=60\sim 150\text{mm}$ においては緩やかに増加している。 $L=150\text{mm}$ に近づくにつれて、速度が増加する傾きが小さくなって

おり、水滴の速度は超音速空気流れの速度と概ね同一となり、水滴は流れに追従していると考えられる。また、水流量が少ないほど速度は大きくなり、 $L=150\text{mm}$ 、 $Q_w=3\text{mL/min}$ における速度は 485m/s であった。図 3 に $Q_w=10\text{mL/min}$ におけるノズル長さ L に対する平均粒径 D_{10} 、 D_{30} 、 D_{32} について示した。計測結果より、いずれの平均粒径においても $L=20\sim 60\text{mm}$ において小さくなるものの、 $L=60\text{mm}$ 以降ではほとんど変化していない。高速気流で液流を吹き飛ばして微粒化する場合、気液の相対速度が大きい場合に微粒化が著しく進むため、図 2 の速度計測結果が示すように、 $L=60\text{mm}$ 以降の相対速度が小さい領域では微粒化が進まない。本計測結果より、マイクロアイスジェットノズルではノズルに供給された水はニードル近傍において微粒化が著しく進み、 $L=60\text{mm}$ では概ね微粒化が完結していると考えられる。また、水滴の加速と冷却はノズル全体 $L=0\sim 150\text{mm}$ の領域において行われ、特に $L=60\text{mm}$ 以降の領域では冷却が主となっていると考えられる。

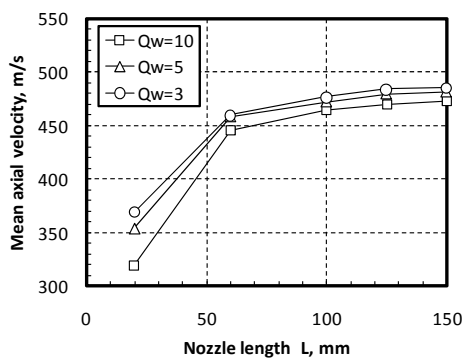


図 2 ノズル長さによる平均速度の変化

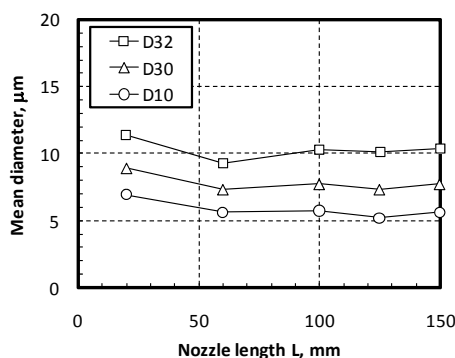


図 3 ノズル長さによる平均水滴径の変化

(2) ノズル内部に供給された水は微粒化されると同時に断熱膨張した圧縮空気との直接熱交換により急激に冷却されるため、水滴の温度は低下する。しかし、微小な水滴は過冷却現象により、 0°C 以下に水滴の温度が低下しても容易に凍結せず液体の状態を保つ

ため、冷却された水滴は 0°C 以下の水滴つまり過冷却水滴となる。水滴の温度がさらに低下し、氷核が生成する条件を満足した場合には、水滴内部に氷核が生成する。そこで、ノズル内における水滴の冷却現象を調べるために非定常熱伝導解析を行った。解析では空気からの熱伝達による水滴温度の時間変化を求めた。水滴は真球状であるとし、水滴の初期温度を 0°C 、周囲空気温度を -100°C 一定と仮定した。過冷却が解除する条件は、水滴の温度、直径、冷却速度から算出することができる。著者らの解析から、冷却速度が $1.05\text{E}+05^\circ\text{C/s}$ においては水滴の直径が $3\sim 35\mu\text{m}$ において $-42\pm 1^\circ\text{C}$ の範囲で氷核が生成することがわかっており、本解析においても -42°C で過冷却が解除されるものと仮定した。また、過冷却水滴の比熱は、 -15°C 以下において急激な変化を生じるため、 $-42\sim 0^\circ\text{C}$ までの平均比熱として、 4.9J/g/K とした。計算は、球のハイスラー線図を用いて行った。熱伝達率は水滴と空気の相対速度により変化するため、 $0\sim 100\text{m/s}$ の範囲を仮定して計算した。

解析結果の一例として、図 4 に水滴直径 $D=10\mu\text{m}$ における水滴と空気の平均相対速度に対する水滴表面温度の時間変化を示す。水滴の表面温度は時間の経過とともに徐々に低下し、相対速度が大きいほど温度の低下は速い。次に、過冷却解除温度 -42°C において、水滴は瞬時に過冷却解除し、氷核が生成するものとして過冷却解除時間を求めた。図 5 に水滴の直径と相対速度から過冷却解除時間を求めた結果について示す。図より水滴の直径が小さいほど、かつ相対速度が大きいほど水滴は短時間に凍結することがわかる。ここで、図中にはノズルの長さから熱解析において仮定した平均相対速度から求めた水滴の滞留時間を二重線で示した。滞留時間よりも水滴の過冷却解除時間が短い条件、つまり図中の二重線より下側の条件において水滴は過冷却解除し、氷核を生成する。本解析結果はノズル出口における粒子の状態相は水滴の粒径により異なり、直径 $5\mu\text{m}$ 以下の微小な水滴はノズル内において氷核が生成することを示している。

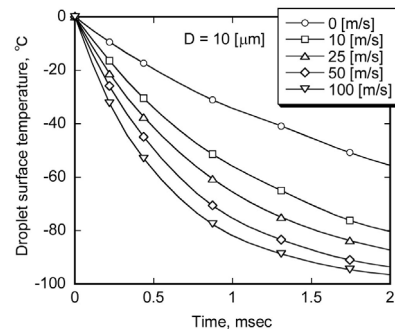


図 4 水滴表面温度の時間変化 ($D=10\mu\text{m}$)

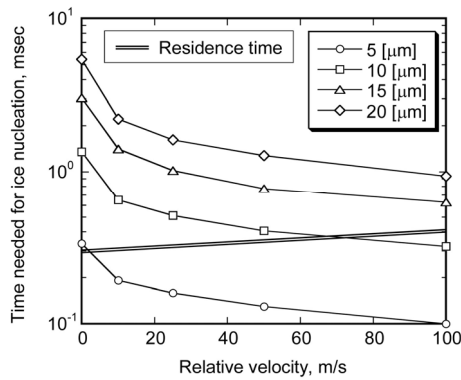


図5 水滴径と相対速度による氷核生成時間

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① 周善寺清隆、星野高明、マイクロアイス
ジェット洗浄技術、砥粒加工学会誌、
2009、548-551

〔学会発表〕(計1件)

- ① 周善寺清隆、超音速空気流れによる水の
微粒化、第20回微粒化シンポジウム、
2011、158-161

〔図書〕(計1件)

- ① 星野高明、周善寺清隆、先端産業分野に
おける洗浄技術、2010、37

6. 研究組織

(1) 研究代表者

周善寺 清隆 (SHUZENJI KIYOTAKA)

福岡県工業技術センター・

機械電子研究所・研究員

研究者番号：00416504