

研究論文

液体 CO₂ の噴射によって形成されるドライアイスパウダー噴流に関する基礎的研究

Fundamental study of dry-ice powder jet formed by issuing of liquid CO₂

天谷 賢児, 関口 直樹, 高橋 哲, 飯島 清貴
 (Kenji AMAGAI) (Naoki SEKIGUCHI) (Satoru TAKAHASHI) (Kiyotaka IJIMA)
 群馬大学 ヤマハ発動機 (株) 群馬大学・学生 (株) フコク
 (Gunma Univ.) (Yamaha Motor Co. Ltd.) (Gunma Univ.) (Hukoku Co. Ltd.)

In recent years, drought and water shortage became serious problems in many countries. In order to precipitate the rain artificially, rainmaking technologies have been studied. In these technologies, the liquid CO₂ jet was used to make the nucleus of the rain. However, the mechanism of enhancement of rain formation by CO₂ jet injection was not clear. On the other hand, the liquid CO₂ jet was used as the dry-ice blasting technology for the cleaning of contaminated surface. In this study, fundamental characteristics of CO₂ jet were investigated experimentally. Fine dry-ice powder was formed in the CO₂ jet. Effects of nozzle diameter and injection pressure on dry-ice powder formation were investigated in detail. Lengths of dry-ice powder jet, injection angles at nozzle exit and jet structures were observed by a Schlieren and a strobe-scope photographs. Particle diameter distribution and mean particle diameter were measured by a microscope and a LDSA system. Average particle size of the fine dry-ice powder was estimated as several ten micrometers.

Keywords: Liquid CO₂ jet, Dry-ice powder, Measurement, Size distribution

1. 緒 言

液体の CO₂ を充填したサイフォン式のボンベから液体 CO₂ を噴出させると、微細なドライアイスの粒子（以下ではドライアイスパウダーと呼ぶ）を含んだ噴流が形成される。このようなドライアイスパウダーを含んだ噴流は、電子基板の洗浄や精密加工が施された金属表面上からの汚れの除去、塗料の除去などに使われており、Dry ice blasting などと呼ばれている⁽¹⁻³⁾。これらの技術は、ドライアイスによる熱的な効果以外に、微細な粒子が洗浄面に衝突することで、ゴミや汚染物を除去するという機械的な効果があり、さらに、被洗浄物を濡らさないという乾式洗浄法としてのメリットもある。一方、近年干ばつや水不足対策として人工降雨の研究が行われるようになってきた。この人工降雨技術においても、ドライアイスパウダーが利用されている^(4, 5)。これは、航空機等により上空の雲内にドライアイスパウダーやドライアイスペレット（大きさ数ミリメートル程度）を撒布して過冷却雲粒を氷晶化させて降雨を促すもので、実際に中国や我が国でも実験が重ねられている。従来から人工降雨法としては、ヨウ化銀を用いる方法が用いられてきたが、環境保全上の問題からドライアイスを用いるものに手法が移りつつある。

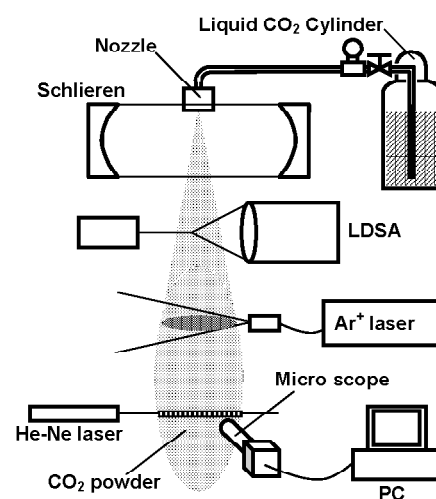


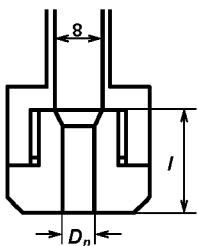
Fig.1 Experimental apparatus

これらのように、液体 CO₂ を噴射した場合に見られるドライアイスパウダーを含む噴流は工学分野だけでなく気象学分野でも利用されている。しかしながら、このようなドライアイスパウダー噴流の構造やドライアイスパウダーの形成条件などに関する研究は行われていないのが現状である。特に、ドライアイスパウダーの粒径やその分布に関する報告は見られない。ドライアイスパウダーを含む噴流を利用して、より洗浄効果を上げたり、人工降雨技術を確認する上で、ドライアイスパウダー噴流の詳細な特性を把握しておくことは極めて重要であると考えられる。そこで、本研究では液体 CO₂ 噴射において形成される噴流の構造や粒径分布などの基本特性を調べることにした。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図1に示す。CO₂ 噴射装置はサイフォン式の液体 CO₂ ボンベに圧力計を取り付け、内径 8mm の配管の先端にノズルを取り付けたものである。配管は銅製で、周囲に断熱材などは施していない。また、内面は特に鏡面仕上げなどの加工はしておらず、図のように緩やかな曲り管の部分があり、その先にノズルを取り付けた。配管長さは 45mm と 85mm とした。ただし、事前に実験を行った結果では、45mm と 85mm のデータには差がほとんど見られなかった。今回用いたノズルは噴孔径が 2, 4, 6, 8mm の 4 種類であるが、2mm および 4mm の場合は、ボンベ出口のバルブが絞りになっており、その後出口のノズルで再度絞られる。これに対して、ノズル出口径が 6mm と 8mm の場合は出口での絞りの効果が小さく、噴射圧は曲り管や直管部分の圧力損失を表示していることになる。ノズルの形状および寸法は図2に示すとおりである。

本実験では液体 CO₂ 噴射において形成されるドライアイスパウダー噴流の長さ、噴流構造、粒径分布などの基本特性を調べた。噴射ノズル出口の噴流の構造を調べるために、シュリーレン法による撮影を行った。また、Ar⁺レーザのシート光を用いて、形成されるドライアイスパウダー噴流の断面構造を観察した。これらに加え、ストロボ光源を用いてドライアイスパウダー噴流の影写真を撮影し、噴流の様子を観察した。さらに、He-Ne レーザのビーム光を噴流中のドライアイスパウダーにあて、その散乱光をマイクログラフ付きの CCD カメラにより拡大撮影し、その写真からパウダーの粒径分布を求めた。これとは別に、ブラウンフォーファ回折を利用した粒度分布測定装置 (型番 LDSA-1300A, レンズ焦点距離 300mm) を用いた粒径測定も行った。



| Nozzle No. | D _n [mm] | l [mm] |
|------------|---------------------|--------|
| 1 | 2 | 15 |
| 2 | 4 | 17 |
| 3 | 6 | 18 |
| 4 | 8 | - |

Fig.2 Test nozzles

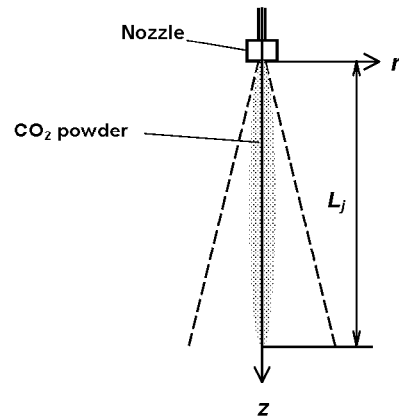


Fig.3 Definition of jet length

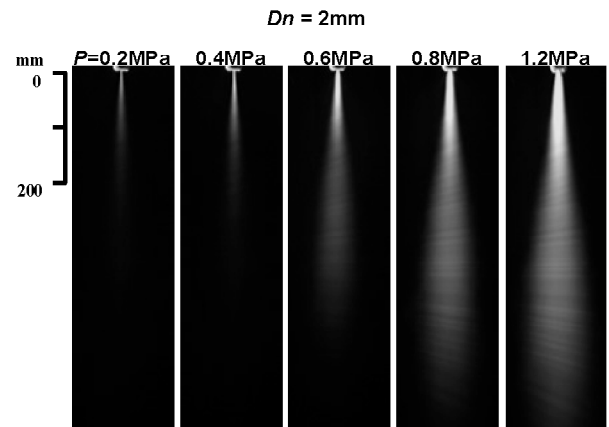


Fig.4 Photographs of CO₂ powder jet

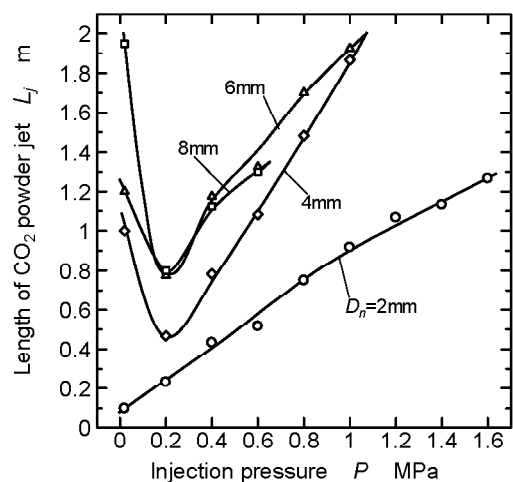


Fig.5 Relation between injection pressure and length of CO₂ powder jet

3. 実験結果および考察

3.1 ドライアイスパウダー噴流の長さ

はじめに、液体 CO₂ 噴射によって形成されるドライアイスパウダー噴流の構造や、ノズル出口における噴流の拡がり角などの巨視的な特性を調べることにした。液体 CO₂ はボンベから流出後に急速な膨張により低温状態 (-70°C程度) となり、これに伴いドライアイスのパウダーが形成される。その後、大気と混合することで昇華して CO₂ ガスへと変化する。このため、図 3 に示すようにパウダー噴流の長さ L_j が定義できる。この長さの測定は目視によって行った。なお、ノズルからの噴射方向を z 軸、半径方向を r 軸とした。測定の際は暗幕を用いて周囲を暗くし、噴流を目視しやすい位置に写真撮影用のレフランプを設置してパウダーからの反射光を観察した。

噴射圧力を変化させた時の噴流の変化を図 4 に示す。図 4 を見ると噴流はノズル付近では密度が濃くはっきりと目視することができるが、ノズルから下流 (z 軸方向) に進むにつれ密度が低くなって見えなくなる。これはドライアイスの粒子が昇華して気体となるためである。

図 5 はこのドライアイスパウダー噴流の長さ L_j を求めたものである。噴射圧力が約 0.2MPa 以下の低い圧力の場合には比較的大きなパウダーが形成される。このときノズルからの長さ L_j は圧力が低いほど長くなった。

0.2MPa 以上の圧力域ではどのノズル径の条件でも噴射圧力の上昇に伴い L_j が長くなった。また、ノズル径が大きいほど L_j も長くなる傾向が見られた。これは噴射圧力が高くなるとノズルから噴射される噴流の運動量が増し、粒子の到達距離が長くなるためと考えられる。また、ノズル径が大きいほど L_j が長くなる理由は噴射される CO₂ の流量が大きくなり、低温域が伸びるためと思われる。

一方、噴射圧が低い条件では CO₂ の膨張がボンベ出口の配管内で生じ、管壁面でドライアイスパウダーが成長するために比較的大きなパウダーとなって噴射されるものと考えられる。噴射された粗大なパウダーは昇華の完了が遅れるために L_j が長くなったと推察される。ただし、噴射圧が低い場合、 D_n が 2mm では、粗大な粒子が見られなかったために、噴流長さの増加は確認できなかった。この理由として、 $D_n=2mm$ で噴射圧が低い場合には流量が少なく温度低下が小さいために配管内での昇華が噴出前に完了してしまうためと推定される。

3.2 噴流出口角の変化

ノズル近傍での噴流の様子をシュリーレン法により観察した。その結果を図 6 に示す。これを見ると、噴射圧力が高いほど噴流内部に形成されるドライアイスパウダーの密度が大きくなっていくのがわかる。噴射圧力 0.2MPa および 0.4MPa では粒子があまり見られないが、0.6MPa 以上になると粒子が多くなる。これらの写真からノズル出口における噴流出口角を求めた。ここで噴流出口角 θ は図 6 に示したようにノズル出口における噴流の拡がり角で定義した。ここでは最も噴射圧力を高くすることができるノズル径 $D_n=2mm$ の場合に噴流出口角の変化を調べた。

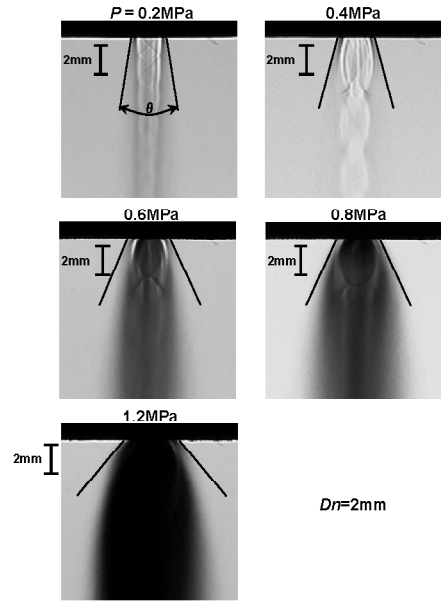


Fig.6 Schlieren photographs of CO₂ powder jet at nozzle exit

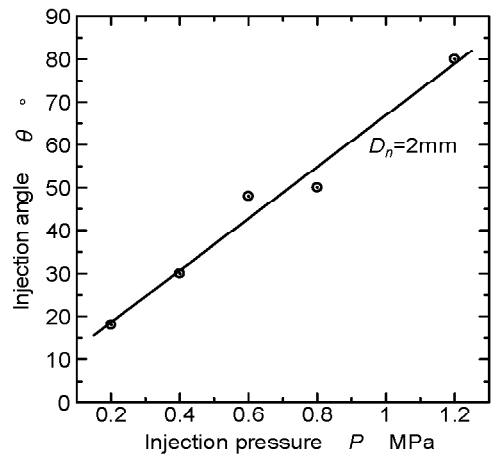


Fig.7 CO₂ jet angle at nozzle exit

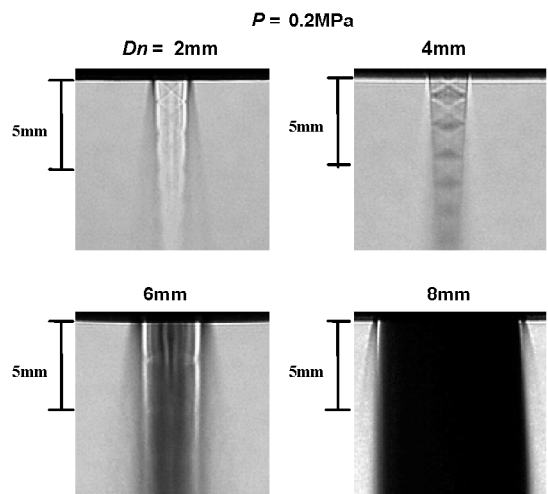


Fig.8 Photographs of CO₂ powder jet

噴射圧力と噴流出口角の関係を図7に示す。これを見ると、噴射圧力 P とともに噴流出口角 θ は大きくなるのがわかる。 $P=1.2\text{MPa}$ では $\theta=80^\circ$ に達している。このような特性は CO_2 溶解燃料の微粒化⁶⁾ や泡沫微粒化⁷⁾ などのように、噴射に伴う圧力低下によって噴出流体が膨張する場合に見られる共通の性質であるといえる。

図8は噴射圧力を 0.2MPa に固定して、ノズル径の違いによるノズル出口の噴流の様子の違いを示したものである。これを見ると各ノズル近傍での噴射構造の違いがはっきりとわかる。ノズル径が 2mm と 4mm では粒子はあまり見られないが不足膨張流が観察できる。ノズル径が 6mm と 8mm では噴流内部にドライアイスパウダーが存在しており、光の透過がさえぎられて不足膨張流が見えなくなっている。このように、噴射圧力が同一でも形成される CO_2 噴流中にドライアイスが形成される場合とされない場合があることがわかった。ノズル径が大きいほどドライアイスパウダーが多くなる理由としては、以下のことが考えられる。 CO_2 ボンベ内から流出する液体の CO_2 はボンベ出口の絞り部で一度膨張する。そこで一旦温度低下を生じてドライアイスパウダーが形成されてノズル出口まで達するものと考えられる。このときノズル径が小さい場合は流量が小さく、ノズルに達するまでに配管内で昇華して CO_2 ガスとなるのでドライアイスパウダーを含まない噴流が形成されるものと考えられる。一方、ノズル径が大きい場合は流量が大きくなり、ノズル出口近くまでドライアイスパウダーが昇華されること無く噴出されるものと考えられる。また、図6および図8の写真を詳細に見ると、噴流の周囲に一度明るい帯の部分が見れ、その外側の最外部においても黒い影が存在している。この部分は噴流中心部のドライアイスパウダーとは異なり、周囲空気中の水分が凝集したものである可能性があるが、現段階では不明である。

3.3 ドライアイスパウダーを含む噴流の断面構造

ドライアイスパウダー噴流の構造を調べるためにレーザシート光による噴流の断面観察を行った。レーザシート光のシート面が噴流の中心軸に垂直になるようにした。図9はシート光の照射位置を z 方向に様々に変えて、斜め上方より撮影した噴流の断面写真を示している。噴流の中心付近ではパウダーの密度が高く、極めて細かい粒子が見られた。また、その外側に比較的大きなパウダーが観察された。図10はこのような噴流の構造をよりわかりやすくするために、噴流のほぼ真上から断面を撮影した写真である。このように、液体 CO_2 噴射では噴流中心部の微細なパウダー流と、その周囲の粗大なパウダー流の二種類の領域が形成されていることがわかる。

前述のように、配管内で形成されたパウダーの一部は合体あるいは管壁上で成長してノズル出口から噴出されると考えられる。したがって噴出されるドライアイスパウダーは気相中で形成された比較的微細な粒子と、合体や壁面で成長した粗大な粒子が混在しているものと考えられる。このような噴射直後のドライアイスパウダー噴流では微細な粒子と粗大な粒子が混在しているが、その後、周囲空気との乱流混合により微細なドライアイスパウダ

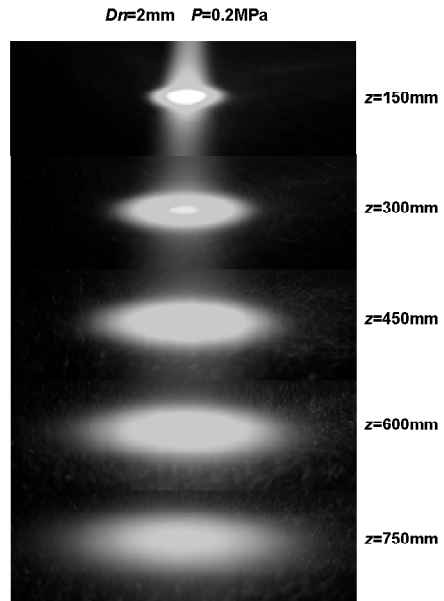


Fig.9 Cross sectional view of CO_2 powder jet

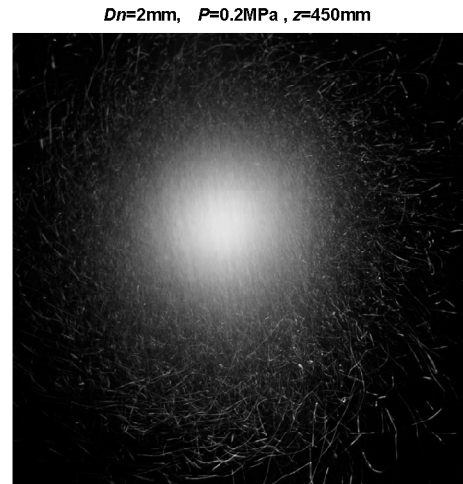


Fig.10 Cross sectional image of CO_2 powder jet

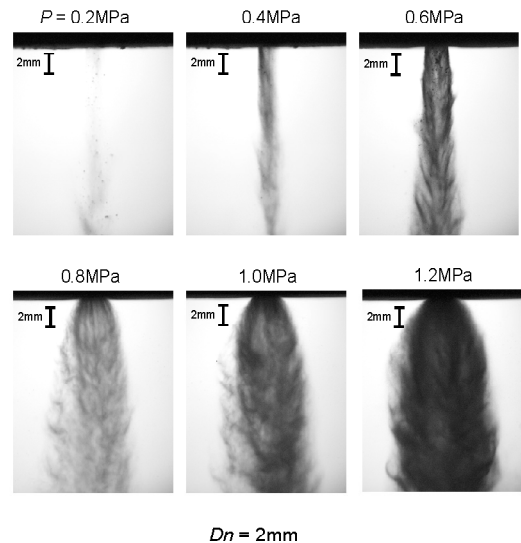


Fig.11 Structure of CO_2 powder jet

一が急速に昇華して消失し、粗大な粒子のみが残ることによって噴流外縁に比較的大きな粒子が見られるものと解釈できる。周囲空気がドライアイスパウダー噴流中に導入されることにより、噴流中に氷の粒子が形成されている可能性がある。しかしながら現段階ではこれらを確認することはできておらず、周囲空気の湿度を変化させて実験を行うなど今後の課題としたい。

3.4 噴射圧力の違いによる噴流構造の変化

次にストロボ光源を用いて瞬時画像を撮影し、噴流の詳しい構造を観察した。図 11 はノズル径 2mm で噴射圧力を 0.2-1.2MPa まで変化させたときのノズル出口近傍における噴流の様子である。これらの写真より、図 6 のシュリーレン法で撮影した時間平均による写真と同様に、噴射圧力が高くなるにつれて噴流出口角が大きくなっていることが分かる。また、噴射圧力の上昇に伴い噴射される粒子の数も増加していることが確認できる。

これらの写真を見ると、いずれの条件においても、形成された噴流はディゼル噴霧で見られるような枝状構造⁸⁾が観察できる。これはドライアイスパウダーの噴流が周囲気体との運動量交換により周囲気体を取り込むような渦運動をしているためと考えられる。このような噴流中への周囲気体の導入が、微細なドライアイスパウダーを優先的に昇華させているものと考えられる。また、噴射圧力が 0.6MPa や 1.0MPa の写真を見ると、噴流中心部においても光の透過量が大きく、噴流中心部だけにドライアイスパウダーが存在するのではなく、比較的均一に噴流全体にわたってドライアイスパウダーが分布していることがわかる。

3.5 ドライアイスパウダーの粒度分布

次にドライアイスパウダーの粒度分布を求めた。上記のように液体 CO₂ の噴出に伴って形成されるドライアイスパウダーは、主に噴流中心部に見られるような微細な粒子と噴流周囲で見られるような粗大な粒子に分けることができる。本実験では、中心付近の微細なパウダー流については LDSA による計測を試みた。また、周囲の粗大パウダーについては、マイクロスコープ付の CCD カメラによる観察を行った。

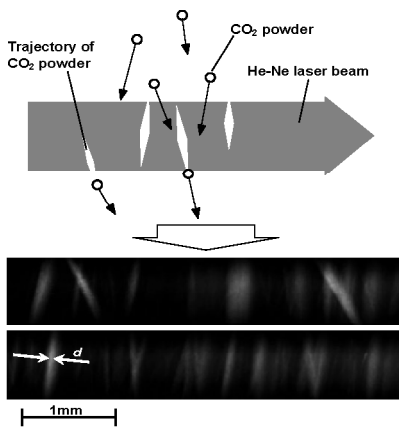


Fig.12 Measurement method of CO₂ powder size by microscope camera

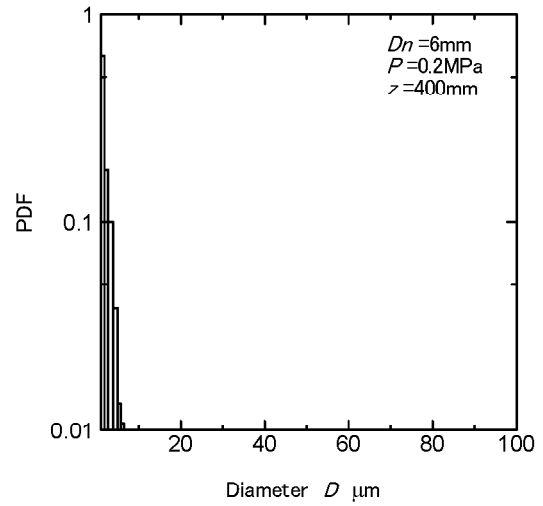


Fig.13 Diameter distribution of CO₂ powder

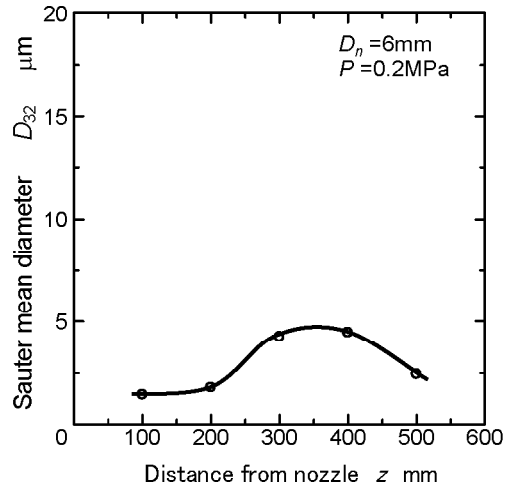


Fig.14 Sauter mean diameter of CO₂ powder

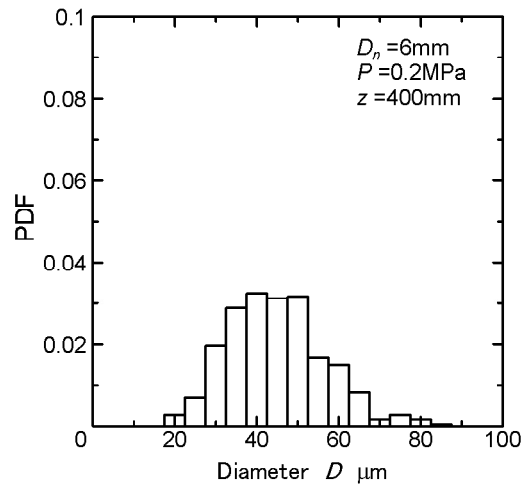


Fig.15 Diameter distribution of rough CO₂ powder

図12はマイクロスコープを用い、粗大な粒子の軌跡の幅から粒径を測定する方法を示したものである。図にあるように、レーザー光を噴流周囲に見られる粗大粒子の部分に通し、そこを通過する粒子からの散乱光の拡大観察を行い、その光跡の幅から粒子の径を求めた。

図13はLDSAを用いて噴流中心の主に微細なドライアイスパウダーで形成されている部分の個数基準の粒度分布を求めた結果である。また、図14は図13の分布から求めたザウター平均粒径のz方向の変化を示したものである。得られた平均粒径は5μm以下であると見積もることができた。LDSAを用いた場合、粒子からの散乱光は光路上にあるすべての粒子からの散乱光を検出するために、噴流外縁部にある粗大な粒子からの信号も検出しているはずである。しかしながら、得られた結果は10μm以下に分布を持つものであった。この理由としては、噴流中心部の微細なパウダーが周囲の粗大なパウダーに比べて格段に粒子数が多いためと考えられる。

また、図14を見ると、z=200mm以降で一度平均粒径が増大し、その後減少する結果となった。この理由としては噴射の初期領域では大小さまざまな粒子が存在するのに対して、噴流の発達とともに微細な粒子の方が早く昇華し、相対的に大きな粒子が残ることによって平均粒径が大きくなるものと考えられる。その後、大きな粒子も昇華してCO₂ガスとなるために平均粒径が小さくなると解釈できる。ただし、LDSAの信頼できる計測範囲の下限が10μm程度であることやドライアイスパウダーの粒子形状が球形ではなく、樹針状結晶である可能性があることを考えると、微細なドライアイスパウダーの粒径計測については今後さらに詳細な計測が必要である。

マイクロスコープにより得られた噴流の外周付近に見られる粗大パウダーの個数基準による粒度分布を図15に示す。この粒度分布より粗大パウダーの大きさは約20~80μmの範囲であることがわかった。LDSAによるより詳しい計測は今後の課題であるが、以上の結果から噴流周囲に存在する粗大なドライアイスパウダーの粒径は中心部の微細なドライアイスパウダーの粒径と大きく異なることが判明した。今後このような粒径の大きく異なるドライアイスパウダーが形成される機構についてもより詳細に研究してゆく必要があると考えられる。

4. 結 言

液体CO₂の噴射に伴い形成されるドライアイスパウダーを含む噴流に関する研究を行った結果、以下の結論を得た。

1. 2MPa以上の噴射圧力ではどのノズル径の条件でも噴射圧力の上昇に伴いパウダー噴流の長さL₇が長くなった。また、ノズル径が大きいほどL₇も長くなる傾向がある。
2. 液体CO₂噴流は噴流中心部の微細なパウダー流と、その周囲の粗大なパウダー流の二種類の領域から形成される。噴流下部では周囲空気との乱流混合により微細なドライアイスパウダーが急速に昇華して消失し、粗大な粒子のみが残ることによって噴流外縁に比較的大きな粒子が見られるものと解釈できる。

3. 粗大なパウダーの平均粒径はおおよそ50μm、噴流中心部の霧状の細かいパウダーの平均粒径はLDSAにより5μm以下と見積もることができた。しかし、LDSAによる計測にはいくつかの課題があり、今後より詳細な計測が必要である。

文 献

- (1) Stratford, S.: Dry ice blasting for paint stripping and surface preparation, *Metal Finishing*, 98-6 (2000), 493-499.
- (2) Elbing, F., Anagreh, N., Dom, L., Uhlmann, E.: Dry ice blasting as pretreatment of aluminum surface to improve the adhesive strength of aluminum bonding joint, *Int. J. of Adhesion and Adhesives*, 23 (2003), 69-79.
- (3) Super, G., Uhlmann, E., Elbing, F.: Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application, *Wear*, 233-235 (1999), 402-411.
- (4) 気象研究所技術報告, 第48号, 日本海降雪雲の降水機構と人工調節の可能性に関する研究, (2005), 200-216.
- (5) Guo, X., Zheng, G., Dezheng, J.: A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide, *Atmospheric Research*, 79 (2006), 183-226.
- (6) Zuen, H., Yiming, S., Shiga, S., Nakamura, H., Krasawa, T., Nagasaka, T.: Atomization behavior of fuel containing dissolved gas, *Atomization and Sprays*, 4 (1994), 253-262.
- (7) Sovani, S.D., Chou, E., Sojka, P.E., Gore, J.P., Eckerle, W.A., Crofts, J.D.: High pressure effervescent atomization: effect of ambient pressure on spray cone angle, *Fuel*, 80 (2001), 427-435.
- (8) 津江光洋, 服部廣司, 斉藤 晃, 角田敏一: 噴射ノズル近傍におけるディーゼル噴霧の内部構造, 日本機械学会論文集, B編, 59-564 (1993), 2584-2589.



天谷 賢児
群馬大学大学院工学研究科
機械システム専攻, 准教授
〒376-8515
群馬県桐生市天神町 1-5-1

略歴: 1992年東北大学大学院博士課程修了, 同年群馬大学工学部・助手, 1996年同学部・助教授, 2007年同大学大学院・准教授。
研究テーマ: 微粒化機構, レーザー計測



関口 直樹
現ヤマハ発動機(株)に勤務

略歴：2007年3月，群馬大学大学院工学研究科機械システム工学専攻修了，同4月ヤマハ発動機(株)入社
在学中 CO₂噴流の計測ならびに評価に関する研究に従事



高橋 哲
群馬大学大学院工学研究科
機械システム工学専攻，学生

CO₂噴流中のパウダー粒径の計測ならびに評価に関する研究を実施



飯島 清貴
現(株)フコクに勤務

略歴：2006年3月，群馬大学工学部機械システム工学科卒業，同4月(株)フコク入社
在学中 CO₂噴流の計測ならびに評価に関する実験に従事