

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

(第 2 報, ドライアイスパウダーの粒径分布)

Fundamental Study of Dry-ice Powder Jet Formed by Issuing of Liquid CO₂ (Part2 : Size Distributions of Dry-ice Particles)

塚田 恒, 高橋 哲, 天谷 賢児, 船津 賢人
(Ko TSUKADA) (Satoru TAKAHASHI) (Kenji AMAGAI) (Masato FUNATSU)
群馬大学 関東自動車工業 (株) 群馬大学 群馬大学
(Gunma Univ.) (Kanto Auto Works, Ltd.) (Gunma Univ.) (Gunma Univ.)

Jet flows containing dry-ice particles were formed by the issuing of liquid CO₂. The dry-ice jet is used for the cleaning and removal of contamination from the surface. In order to investigate the jet structure and the characteristics of dry-ice particles, some optical observations are carried out. Photographs of dry-ice particles in the jet were taken by a microscope camera with a Nd:YAG pulse laser system. Diameter distributions and mean diameters of dry-ice particles were derived from the photographs. Shape of dry-ice particles was also estimated. Moreover, it was confirmed that the condensed water droplets were observed around dry-ice particles. ILIDS method was applied on the diameter measurement of water droplet.

Keyword: Liquid CO₂ jet, Dry-ice particles, Diameter distribution

1. はじめに

液体の CO₂ をサイフォン式のボンベから噴出すると, CO₂ が固体となったドライアイスの粒子 (ドライアイスパウダー) を含んだ噴流が形成される. この噴流は電子基板や精密加工された部品の洗浄, または, 加工くずの除去手段として用いられ Dry ice blasting と呼ばれている⁽¹⁻³⁾. このような技術は被洗浄物を傷つけず, 洗浄剤が残留することが無いという特徴を有していることから工業的に多用されている. また, 最近では人工降雨制御の方法として, 上空で氷晶核を形成させるために, ドライアイスパウダーを散布することが研究されている^(4,5). このように噴流中に形成されるドライアイスパウダーについては, 工学分野だけではなく様々な分野でも利用されつつある. しかしながら, 形成されるドライアイスパウダーの特性については, ほとんど研究されていないのが現状である. そこで著者らは, 前報においてドライアイスを含む液体 CO₂ 噴流の基本的特性を調べた⁽⁶⁾. 本研究ではより詳細に噴流構造や, ドライアイスパウダーの粒径分布を調べることにした. また, 何らかの方法で噴出されるドライアイスパウダーの粒径を制御することができれば, 効果的に降雨を促進する技術にも応用できると考えられる. さらに, 前述の Dry ice blasting 技術においても, 被洗浄物の条件に合わせて粒子の粒径や噴流の特性を変化させることができれば, 洗浄効果の促進や, 少ない CO₂ 使用量で効率的な洗浄を行う技術に貢献することができる. このような観点から本研究では, 噴射口に拡大管を取り付け管内での滞留時間を延ばすことによって, ドライアイスパウダーの粒径を大きくすることも試みた.

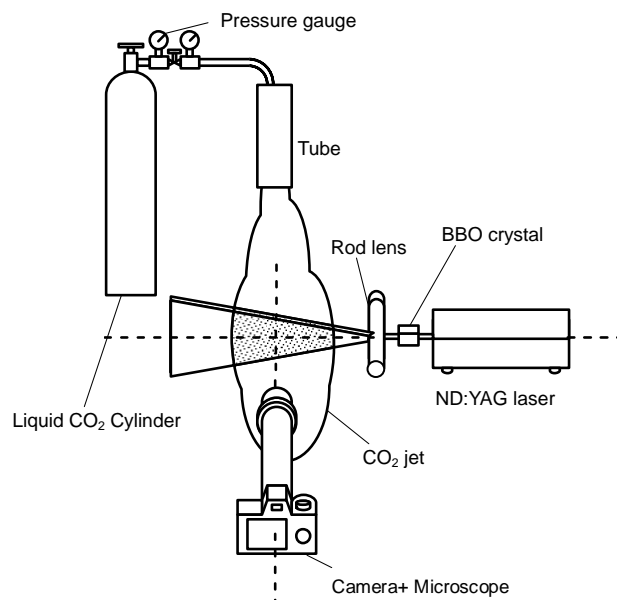


Fig.1 Experimental apparatus

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図 1 に示す. 液体 CO₂ 噴流の発生装置はサイフォン式の CO₂ ボンベに圧力計とバルブを取り付けた筒

単な構造である。ポンペの出口に内径 8mm の銅製の円管を取り付け、その先端に内径 6mm の絞りを取り付けた。円管の長さは 400mm とした。この円管長さの影響については前報⁶⁾で示したので本報ではこれを一定とした。また、円管と同じ、内径 8mm のストレートノズルも用意した。さらに、内径 20mm、および、30mm の真鍮製の拡大管を準備し、これを 8mm の円管出口に取り付けた。この拡大管の長さはそれぞれ 200mm、300mm、400mm を用意した。これは円管の出口に拡大部を設けることで、内部に循環流が形成されるとともに、拡大管内の滞在時間が延びることでドライアイスパウダーの合体が促進されることを期待したものである。

噴流構造やドライアイスパウダーの形状評価のために様々な可視化観察を行った。噴流の全体的な様子を調べるために、ハロゲンランプを用いた反射散乱光による噴流構造の観察のほか、Nd:YAG レーザー (Spectra-Physics 社製 INDI-40-10) のシート光を用いて噴流の断面写真も撮影した。このときのレーザーシートの厚みは約 0.5mm である。また、顕微鏡を装着したデジタルカメラ (Pentax 社製 *istD) を用いてドライアイスパウダーの瞬間拡大撮影も行った。

ここで用いたデジタルカメラのピクセル数と顕微鏡の実視野から、1 ピクセルあたりに得られる実空間の分解能は約 6 μ m と見積もることができた。ドライアイス噴流の噴出速度を 100m/s 程度と仮定すると、YAG レーザーの発光時間が約 10ns であるので、発光時間内の移動距離は約 1 μ m と見積もることができる。したがって、ここで用いている撮影系においても十分に静止画像を得ることができると考えられる。後述のように、実際の拡大写真からも粒子の静止画像が確認されている。このようにして得られた画像から粒子形状や粒子径を求めた。

また、粒子像を散乱光写真として撮影する場合、粒子径の小さい場合にはカメラの F 値により実際の粒径と撮影された粒径が異なることが知られている。この補正式は以下のように与えられている⁷⁾。

$$d_{image} = \left[\frac{d_p^2}{S^2} + \left(2.44 \left(1 + \frac{1}{S} \right) f_{\#} \lambda \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここで d_p は実際の粒径 [μ m]、 d_{image} は撮影した画像から求められる粒径、 S は倍率、 $f_{\#}$ は F 値、 λ は照射光の波長である。今回の倍率は 4.5、F 値は 27、レーザー波長を 532nm とした。

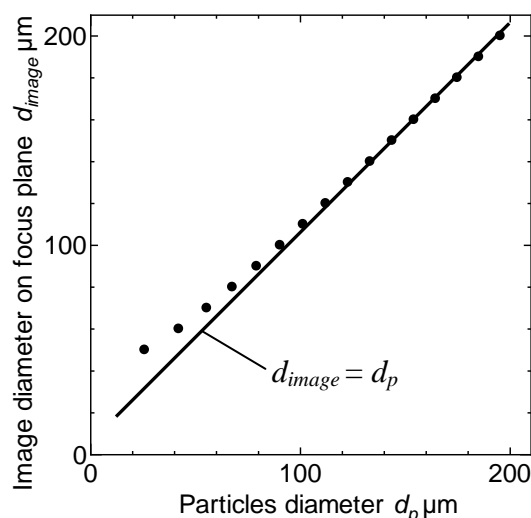


Fig.2 Difference between image particles and actual particles

これによって得られる撮影像と粒子の実際の径との比較を図 2 に示す。150 μ m 以下のものは補正が必要であることがわかる。また、ドライアイスパウダーは球形ではないため、ここでは粒径を円相当径として評価した。すなわち投影面積に等しい面積を持つ円を求め、その直径を用いることにした。また、形状評価として円形度および、凹凸度も求めた。

円形度 α は、粒子の投影面積に等しい円の周囲長 L と、実際の周囲長を L_R としたときに、

$$\alpha = \frac{L}{L_R} \quad (2)$$

で与えられるもので、粒子が円に近いほど 1 に近い値をとる。

また、凹凸度 β は、粒子の投影面積を S 、凸部をむすんだ包絡線で囲まれた面積 (包絡面積) を S_R として、次式で与えられる量である。

$$\beta = \frac{S}{S_R} \quad (3)$$

したがって、凹凸度は凸部が少なくなるほど 1 に近い値となる。

後述のように、CO₂ 噴流ではドライアイスパウダーとともに極めて粒径が小さい煙状の物質が観察された。この物質は周囲空気の湿度が高い時に多く観察されることから、空気中の水蒸気がドライアイスに冷やされ、凝集したものと推定できる。このような水蒸気の凝集は、実際に CO₂ 噴流が応用される人工降雨技術では重要な情報となることから、ここではこの凝集粒子の粒径も測定することにした。

この測定にはレーザー干渉画像法 (Interferometric Laser Imaging for Droplet Sizing) を用いた⁸⁾。この手法は、レーザー光を粒子に照射し、粒子からの散乱光を焦点位置以外で観察することにより干渉縞像を求め、干渉縞の本数から、粒径を求める方法である。干渉縞と粒径 d の関係は次式で表わされる⁸⁾。

$$d = \frac{2\lambda N}{\alpha} \left(\cos \frac{\theta}{2} + \sqrt{m^2 - 2m \cos \frac{\theta}{2} + 1} \right) \quad (4)$$

ここで、 λ はレーザー波長、 N は干渉縞の本数、 α はレンズ集光角、 θ は受光にらみ角、 m は液体と周囲気体の相対屈折率である。

ILIDS の光学系は図 3 に示すようなものであり、70° の受光にらみ角が付くように、レーザー光の入射角を設定した⁸⁾。

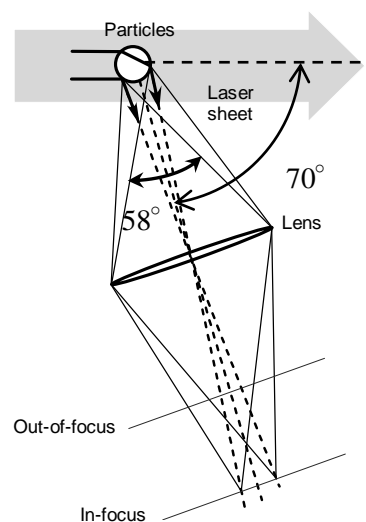


Fig.3 Principle of ILIDS

ただし、干渉縞の観察にもマイクログラフを用い、できるだけ小さな干渉縞の信号を検出できるようにした。レーザー波長は 532nm であり、集光角を 58°、相対屈折率を 1.33 とした。また、この方法による最小検出粒径は約 2 μ m となり、前述の直接撮影法に比べて小さな粒径まで測定可能である。

3. 実験結果および考察

3.1 ドライアイスパウダーを含む噴流の観察

はじめに噴流の様子を観察した。図 4 は噴射圧を 0.1MPa に固定し、8mm のストレートノズル、および、拡大円管を取り付けた場合の噴流の様子を示したものである。この写真は光源としてハロゲンランプを用いて、噴流からの反射光を撮影したものである。ここで、 P_{inj} はドライアイスパウダーの噴射圧力、 L_e は拡大管の長さ、 d_e は拡大管の内径を示している。

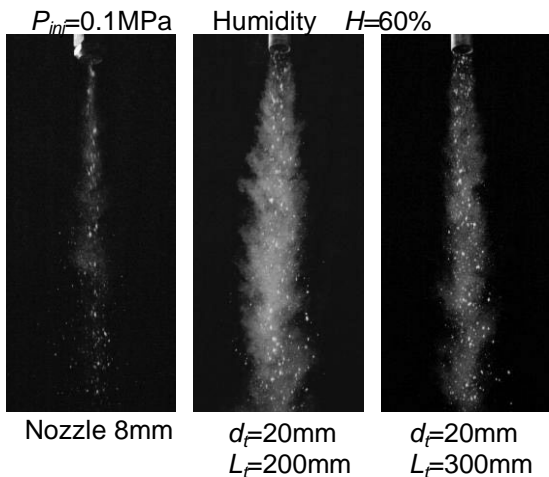


Fig.4 Photographs of CO₂ jet

写真を見ると、いずれの場合にも比較的大きな粒子とともに煙状の物質が形成されているように見える。拡大管やノズルの出口における噴流温度（熱電対を挿入して求めた気相部の温度）は約 213K となることから、この煙状の物質は噴流に巻き込まれた大気が冷やされ、大気中の水蒸気が凝縮したものと考えられる。

これを確かめるために内径 20mm、長さ 200mm の拡大管の周りに乾燥した N₂ ガスを噴射させる実験を行った。その写真が図 5 である。

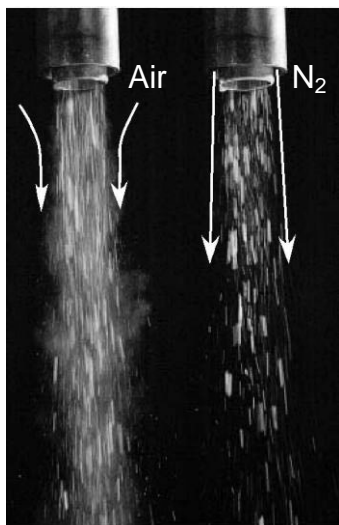


Fig.5 CO₂ jets with and without nitrogen gas flow

この方法により N₂ ガスが噴流周囲を取り囲むことで大気が CO₂ 噴流内に導入されるのを防ぐことができる。この写真を見ると N₂ ガスを噴射することで煙状の物質がほとんど見られなくなることがわかる。このことから図 3 に見られた煙状の物質は空気中に含まれる水蒸気が、低温の CO₂ 噴流中に取り込まれて冷やされ、凝縮することで微細な氷または水滴になって現れたものと判断した。

3.2 拡大瞬間撮影によるドライアイスパウダーの粒径評価

次に YAG レーザーシート光を光源として、拡大撮影を行った。得られたドライアイスパウダーの拡大画像の例を図 6 に示す。ここで、 z は噴射口からの距離を示している。ドライアイスパウダーは比較的大きなものから十数 μ m オーダーの小さなものまで見られ、不規則な形状を示していることがわかる。さらに、粒子の後には尾を引いた煙のような微細な粒子が存在している。この煙のような物質が前述したドライアイスパウダーに接触して大気中の水分が冷やされ凝縮したものと考えられる。

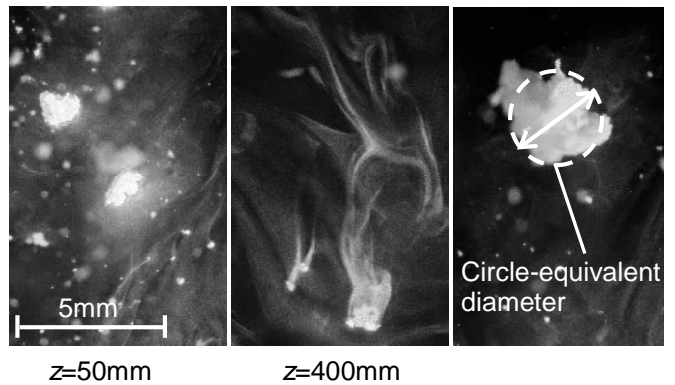


Fig.6 Microscope photographs of dry-ice particles

このような大気中の実験の画像データをもとにドライアイスパウダーの粒径分布を求めた。今回行った拡大撮影ではレーザーのスリット光を一方向から照射している。このために粒子の一方のみが照らされて粒子形状が正確に求められない可能性が考えられた。しかしながら、図からもわかるように、レーザー光の照射を受けていない側の形状も確認することができており、拡大撮影法を用いてもある程度正確な粒子評価が可能であると考えた。ただし、上述の煙状の物質は拡大撮影法の計測限界（本システムの場合約 6 μ m）以下であり、直接拡大撮影法では計測ができなかった。

得られた画像はパソコンに取り込み、粒径解析ソフト（旭化成エンジニアリング社製）を用いて粒子径を求めた。このとき画像中の粒子でフォーカスのずれているものや、粒子が重なり合っているものは目視により除外した。また、粒径分布を求める場合には、計測粒子数は最低でも 500 個以上とした。この計測粒子数は粒径分布を求めるための統計的な信頼性を確保するためには、必ずしも十分ではないが、ドライアイスパウダーが空間内に分散しているために、一枚の撮影像の中で得られる粒子数が十数個程度となり、500 以上の粒子を採取するには時間がかかることから、今回はこのような計測粒子数に止めた。

図 7 は 6mm の絞りおよび円管を取り付けて噴射した場合のドライアイスパウダーの粒径分布の例である。ここで r は噴射口中心からの距離、 d_e は絞り内径を示している。測定位置はいずれの場合も絞り出口、または円管出口から下流に向かって 100mm の位置である。この時、目視にてドライアイスパウダーと液滴を見分け、ドライアイスパウダーのみを計測した。ただし、粒径分布については 6 μ m 以下のものは測定が

できないので、粒径分布の0~100 μm の粒子数は100 μm 以下で測定可能だった粒子の総量となっている。

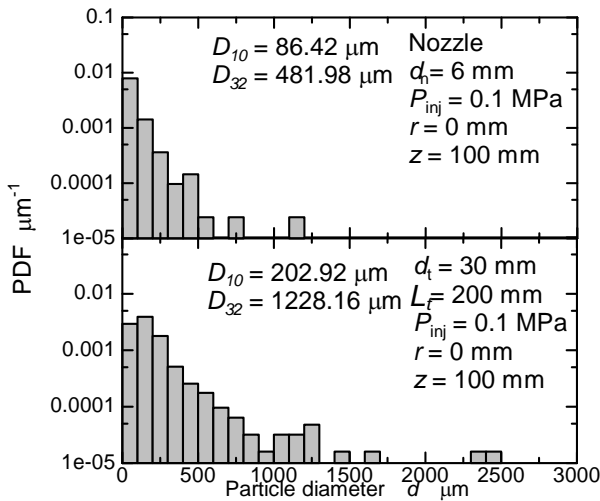


Fig.7 Particle diameter distributions of dry-ice particles

6mmの絞りをを用いた場合に形成される粒子を見ると、数十 μm の粒子数が最も多いが、1000 μm を超える大きな粒子も見られた。一方、拡大管によって形成された粒子は、6mmの絞りの場合と比べて数十 μm の粒子数が減少し、1000 μm 以上の粒子が多く形成されていることがわかる。また、最大粒径が約2500 μm にまで伸びて、分布幅も広がっていることがわかった。このように、CO₂噴流によって形成されるドライアイスパウダーの特徴は通常の液体噴射で見られる噴霧の粒径範囲に比べ粒径分布が極めて広い範囲に広がっている点が上げられる。

次に平均粒径を調べた。本研究で取り扱っているドライアイスパウダーは不規則な形状をしており、円相当径として粒径を求めていることから、最も単純な算術平均径 D_{10} を用いて評価することにした。図8は6mmと8mmのノズル、および、拡大管の径を変えたときに形成されたドライアイスパウダーの算術平均粒径 D_{10} を比較したものである。図の横軸はノズルおよび拡大管の出口径としてある。

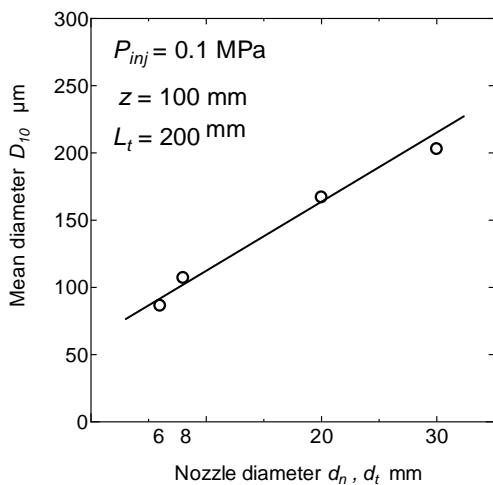


Fig.8 Effect of nozzle diameter on mean diameter

6mmと8mmのノズルの場合は D_{10} が100 μm 程度であるのに対し、内径20mmの拡大管を取り付けると D_{10} は150 μm と大きくなった。さらに30mmの拡大管を取り付けた場合は D_{10} が200 μm まで増加した。これは管の径が大きくなるほど

拡大管内での流速が遅くなり、滞在時間が増え、粒子同士の合体が起こりやすくなったためと考えられる。また、拡大部において循環流が形成されるために合体が促進されたものと推定できる。

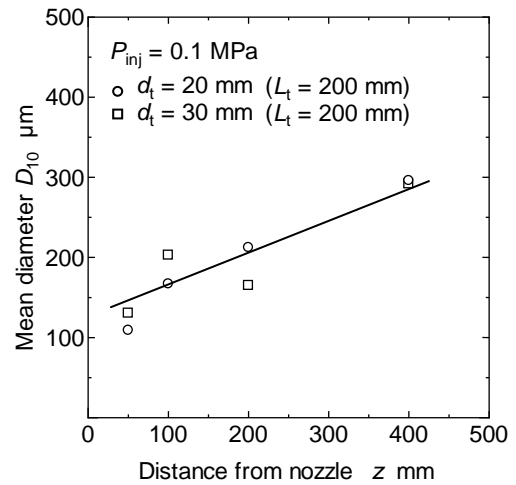


Fig.9 Arithmetic mean diameters of dry-ice particles

図9は内径20mmと30mmの拡大管によって形成されたドライアイスパウダーの D_{10} が、拡大管からの距離によってどのように変化するかを調べた結果である。これより下流になるほど D_{10} が大きくなる傾向があることがわかる。これはドライアイス噴流が周囲空気を巻き込むことで噴流内の気体温度が上昇し、微細な粒子の方が先に昇華して消滅するために、相対的に粗大な粒子の割合が増加して D_{10} が大きくなったものと考えられる。

3.3 ドライアイスパウダーの形状評価

ドライアイスパウダーの形状を評価した。その結果を図10および、図11に示す。

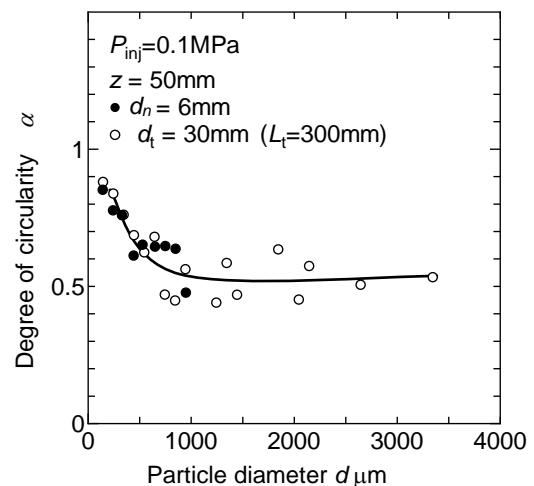


Fig.10 Circularity of dry-ice particles

図10はすべての粒子の円形度を求め、各粒径ごとの円形度の平均値を表したものである。図中には6mmの絞りと内径30mmの拡大管の実験で得られたドライアイスパウダーのデータを合わせて示してある。また、光学系の解像度を考慮して、100 μm 以下の粒子については正確に細かい形状をとらえられない可能性があるためと判断してデータから除外した。図より1000 μm 以下の場合には、粒径が小さいほど円形に近い形となることがわかる。また、1000 μm 以上になると円形度は

あまり変化していない。

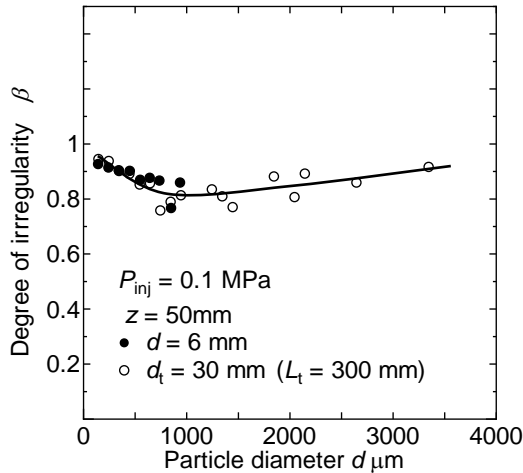


Fig.11 Irregularity of dry-ice particles

図 11 は同様に凹凸度を求めた結果をまとめたものである。図より 1000 μm までは凹凸度が下がっている。しかし 1000 μm を超えると凹凸度が大きくなるように見える。粒径に対して極小値が現れる理由として、次のようなことが考えられる。図 6 のような写真を詳細に観察すると、粒子表面の凹凸には特定のスケールがあるように思われる。このスケールは粒径によってあまり変化せず、粒径が 1000 μm 以下の小さい場合は、このスケールよりも粒径が小さくなるために、凹凸が小さくなる。一方、1000 μm 以上では粒子の投影面積が大きくなり、相対的に凸部が小さくなることから、包絡面積が投影面積に近づくために 1 に近い値になったものと考えられる。

拡大管を取り付けた場合と取り付けない場合を比較すると、図 10、および、図 11 より 1000 μm 以下の粒子については両者が同じような値をとっていることがわかる。このことより、1000 μm 以下のドライアイスパウダーは拡大管の有無によらず同じように生成されているものと考えられる。また、拡大管がある場合は、複数の粒子どうしが拡大管内で合体し、1000 μm を超える粗大な粒子が形成されるものと解釈できる。

3.4 ILIDS を用いた凝集粒子の粒径評価

前述のようにドライアイスパウダーの周囲に、氷または水滴と考えられる凝集粒子が観察された。この部分についても粒径計測を試みた。粒径を見積もるために、ここではレーザー干渉画像法 (ILIDS) ⁽⁶⁾ を用いた。ILIDS では焦点のずれた画像を撮影することになる。実際に得られた写真の例を図 12 に示す。図の右には典型的な 2 種類の観察像を示している。

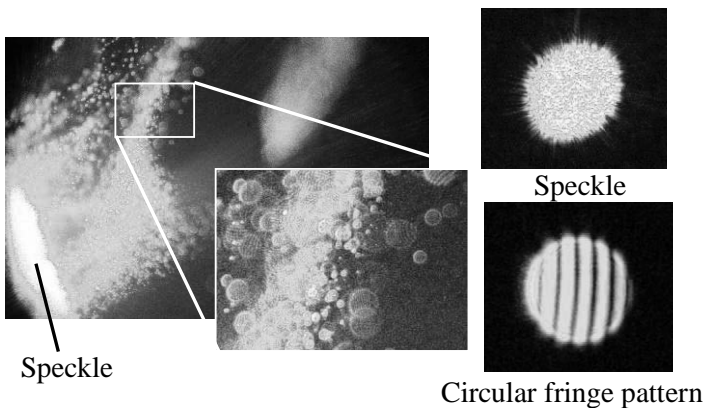


Fig.12 In-focus photographs of particles in CO₂ jet

レーザー光が透過しないドライアイスと思われる粒子からは、まだら模様のスペックルが見られ、干渉縞が現れない。これに対して水滴と考えられる粒子の場合は干渉縞ができています。図中の左の写真で見られるように、大きなスペックルの像のあとに無数の干渉縞粒子が観察された。この部分が図 6 の煙状のものに対応している部分である。ただし、水滴に ILIDS を適用すると、レーザー光の照射方向に対して、干渉縞が直交するの向きに見られるはずである。

しかし今回撮影した干渉像はレーザー光の照射方向に直交するものだけではなく、斜めになっているものも撮影されている。これにはいくつかの要因が考えられる。まず、レーザー光の偏光面がランダムな場合には、干渉縞が傾く場合がある。これについては、本システムを液体噴霧に適応した場合には、すべて干渉縞が直交していることが確かめられており、レーザー光の偏光面の問題ではないと考えられる。粒子が極めて小さなドライアイスパウダーだった場合には、粒子表面の接近する 2 点のみで光が反射されると、反射光が干渉しあって干渉縞が形成される可能性がある。また、小さな氷の結晶の場合にもこのような傾いた干渉縞が形成されることが予想される。さらにドライアイスパウダーの周りに氷が付着した複合粒子が形成されている可能性も否定できない。そこで今回の計測においては、干渉縞が垂直で、明瞭なもののみを抽出して計測を行うことにした。特に後述するように下流になると、レーザー光と直交する向きの干渉縞が増えてくることから、氷の結晶が存在している可能性が高い。その他に、ドライアイス粒子の核とした水滴が存在している可能性がある。この場合にも干渉縞が発生するが、今回はドライアイスパウダーの周囲に発生する粒子の粒径計測を目的としているので、含めて計測を行った。

ドライアイス噴流の計測に先立ち、ILIDS による計測によって正しい粒径分布を求めることができることを検証するために既知の粒径の粒子を用いて実験を行った。このためにガラスビーズを用いて、直接撮影し測定した粒径分布と ILIDS により算出された粒径分布とを比較した。その結果を図 13 に示す。ともにピーク位置が重なるグラフとなり、粒径分布がほぼ一致することが確認できた。また、それぞれの測定法における平均粒径 D_{10} が直接拡大撮影法で 17.5 μm と ILIDS で 13.6 μm となった。

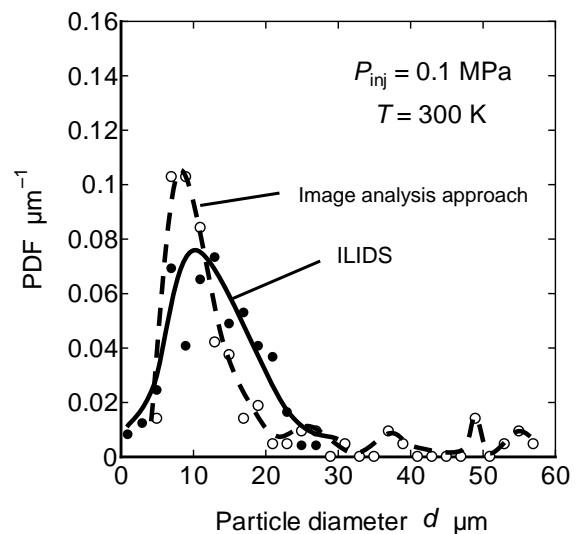


Fig.13 Size distributions of glass particles measured by ILIDS and microscopic image

ただし、測定可能範囲は直接測定した場合は最大約 60 μm であったのに対し、ILIDS で計測した場合は約 30 μm となっている。これは ILIDS による測定では粒径が大きくなるにつれ

4. おわりに

て干渉縞の本数が増え、読み取ることができなくなったためである。

実際のドライアイスパウダーまわりに見られる凝集粒子の計測結果を図 14 に示す。上の図は測定位置が噴射出口から 200mm のもので、下の図は 350mm のものである。

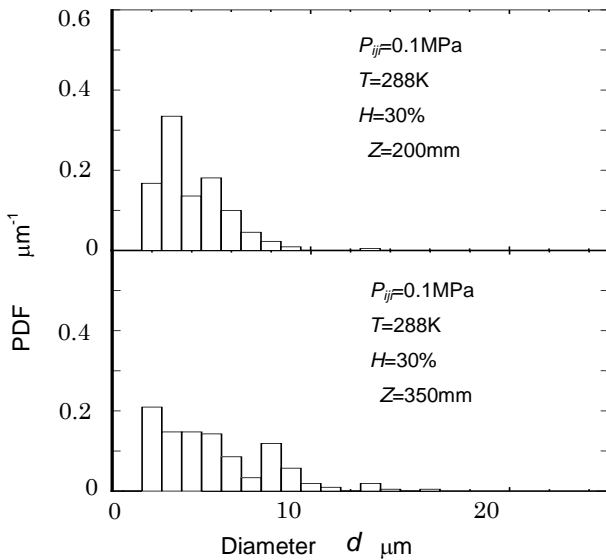


Fig.14 Size distributions of condensed water droplets

上下の図を見比べると 200mm の位置に比べて 350mm の位置では 10 μm 以上の大きな粒子の割合が増加している。これは粒径の小さい粒子ほど早く蒸発するために、相対的に大きな水滴が多くなっているものと解釈できる。また、噴流内に取り込まれた空気中の水分が凝集水滴にふれることで、さらに成長している可能性が考えられる。噴射位置から下流方向に、干渉縞の様子を見てみると、下流になるほどレーザー光に対して直交する向きに干渉縞が現れる粒子の割合が増加することが確認できた。これは下流になるにつれ氷粒が溶けて水滴になってゆくためと解釈できる。

図 15 に噴射口からの距離に対する凝集粒子の平均粒径 D_{10} とザウター平均粒径 D_{32} の変化を示す。これにより平均粒径は約 3 μm ~5 μm であるということがわかる。下流に向かうほど平均粒径の値が大きくなっているのは、前述のように粒径の小さな粒子が先に蒸発するために、相対的に D_{32} が大きくなっているためと考えられる。

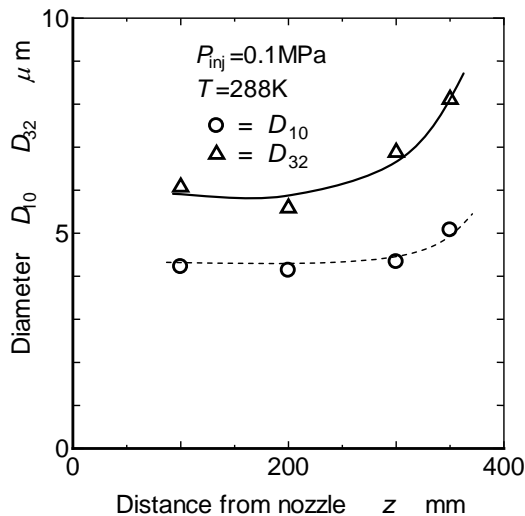


Fig.15 Mean diameter of water droplets formed around dry-ice particles

液体 CO_2 噴射に伴って形成されるドライアイスパウダーの特性を調べた結果、以下の知見を得た。

1. 液体 CO_2 を噴射した場合に形成されるドライアイスパウダーの粒径は数 μm の小さなものから数千 μm 程度の粗大なものまで幅広い粒径範囲をとる。
2. 拡大管を用いることでドライアイス粗大化させることができた。また拡大管の内径を 20mm と 30mm としたとき、30mm の方が、平均粒径が大きくなる。
3. ドライアイスパウダーが周囲気体を冷却することでドライアイスパウダーの周囲に水滴または氷の粒子が形成される。それらの粒子の平均粒径 D_{10} は約 4 μm ~6 μm と見積もることができた。

文献

- (1) Stratford, S.: Dry ice blasting for paint stripping and surface preparation, Metal Finishing, pp.493-499, 98-6, (2009).
- (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 Adhesives, pp.69-79, 23, (2003).
- (3) Super, G., Uhlmann, E., Elbing, F.: Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application, Wear, pp.402-411, 233-235, (1999).
- (4) 村上正隆, 松尾敬世: 日本海降雪雲の降水機構と人工調節を可能にする研究, 気象研究所技術報告第 48 号, pp.200-235, (2005).
- (5) Gue, X., Zeng G., Dezhnev, J.: A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide, Atmospheric Research, pp. 186 -226, 79, (2006).
- (6) 天谷賢児, 関口直樹, 高橋哲, 飯島清貴: 液体 CO_2 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, 日本微粒化学会, 微粒化, 16-55, pp.17-23, (2007).
- (7) New Wave Research, Inc.: Operator's Manual, New Wave Research, Inc. Solo PIV Nd:YAG Lasers, pp.4-59 -4-60.
- (8) 川口達也, 小林俊弘, 前田昌信: レーザー干渉画像法による噴霧液滴径・速度の面的同時計測法の開発, 日本機械学会論文集 (B 編), 66-666, pp.431-438, (2002).



塚田恒
群馬大学大学院 工学研究科
機械システム工学専攻
エネルギー第一研究室

略歴: 2009 年 3 月, 群馬大学工学部機械システム工学科卒業, 現在, 群馬大学大学院工学研究科機械システム工学専攻博士前期課程在学中, 主として潤滑用オイルミストの研究に従事



高橋哲
現関東自動車工業（株）に勤務

略歴：2009年3月，群馬大学大学院工学研究科博士課程前期修了，同4月関東自動車工業（株）入社。在学中 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に従事。



天谷賢児
群馬大学大学院 工学研究科
機械システム工学専攻，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，2008年同大学大学院・教授。
研究テーマ：環境流体工学，微粒化，噴霧，レーザー計測



船津賢人
群馬大学大学院 工学研究科
機械システム工学専攻，准教授
〒376-8515
群馬県桐生市天神町 1-5-1

略歴：2000年東京工業大学大学院博士課程修了，同年群馬大学工学部・助手，2007年同大学大学院・助教，2009年同大学大学院・准教授。
研究テーマ：高速高温流体力学，炭素系材料の耐熱試験，分光法によるプラズマ診断