

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 4 月 26 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560200

研究課題名（和文）プローブ式凍結法による粒径計測法の開発

研究課題名（英文）Development of a Probe-Type Freezing Method for Droplet-Size Measurement

研究代表者

志賀 聖一（SHIGA SEIICHI）

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00154188

研究成果の概要（和文）：

プローブ式凍結法を考案し、装置製作、微小粒子を生成できる加湿器（超音波振動子型）やネブライザー（数万個の微小ノズルと超音波振動子の組み合わせによる医薬吸引器）の噴霧に対して適用した。その結果以下のことが明らかとなった。

- (1) プローブ式凍結法を用いて、球状の凍結粒子を生成することができ、粒子計測への適用が可能である。
- (2) プローブ式凍結法を用いることで、蒸発や合体の影響が常温の噴霧に比べて小さい条件での計測が実現できると解釈されるいくつかの物理現象が明らかとなった。
- (3) 従来型位相ドップラー法や前方微小角散乱法に比較して、 $10\mu\text{m}$ 以下の微小粒子分布が高いことから、これらの微小粒子計測に適しているという大きな特長がある。

しかしながら、プローブ式凍結法では、常温の噴霧の一部をプローブ内に導入して凍結させるため、そのままの瞬間影写真では、1000倍以上の高拡大率において被写界深度が著しく低下してしまい、1枚の画像で計測可能な粒子数は平均5個程度と少なく、データレートの低さという問題の存在が明らかになった。この問題を解決するために、直接凍結サンプリング法を開発した。これは、プローブではなく、断熱容器に入れた受け止め皿に直接に噴霧を導入するという方法である。とくに、位相ドップラー法との比較検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 比較的粒径の小さいザウター平均粒径(SMD) $\leq 10\mu\text{m}$ の加湿器やネブライザーでは、 $2\mu\text{m}$ 以下の粒子分布において直接サンプリング法の分布のほうが小さくなる。これは、新たに導入した最新式の位相ドップラー法のシステムが、 $10\mu\text{m}$ 以下の微小粒子計測の精度を向上させた最新式のものであることが大きな理由であると考えられるが、それ以上の粒子分布はおおむね同一であり、直接サンプリング法という簡便な方法であっても十分実用に供すことのできることが明らかとなった。
- (2) 比較的粒径の大きなSMD $\geq 50\mu\text{m}$ を持つ中空噴霧（スワール式ノズルで生成）においては、直接サンプリング法の粒径分布は位相ドップラー法よりも大粒径側に顕著にシフトした。これは、位相ドップラー法のダイナミックレンジの狭さゆえと考えられ、大きな特長といえる。
- (3) 以上のことから、微小粒子計測における利点は従来の位相ドップラー法よりは優れるが、最新式のものよりは劣ること、ダイナミックレンジの広さは証明された。

研究成果の概要（英文）：

A so-called probe-type freezing method was invented, and applied to sprays with smaller size droplets produced from a humidifier (ultrasonic vibrator type) and a nebulizer (tens of thousands micro-holes combined with ultrasonic vibrator, used for medical sucking). Followings were revealed.

- (1) With the probe-type freezing method, sphere shaped frozen particles could successfully be produced, and it is useful to be applied for droplet-size measurement.
- (2) With the probe-type freezing method, it is useful to measure droplet size measurement under the condition that the effect of evaporation and coalescence could be minimized,

and thus several physical phenomena were clarified related to them.

- (3) The probe-type freezing method has an advantage in the measurement of droplets less than 10 micro-meter comparing with a conventional phase Doppler anemometry and a narrow-angle forward scattering technique, since the droplet diameter distribution in smaller range for the freezing method is more than those obtained with a phase Doppler and a scattering technique.

However, in the probe-type freezing method, when the frozen droplets were observed directly during their falling process with a digital microscope, the enlargement rate greater than 1000 caused seriously narrower focusing depth, and the average measurable number of droplets captured on one photograph was only five. Thus, there appeared a problem of less data rate. In order to solve this problem, a direct freezing sampling method was developed. This method introduced spray directly into a sampling dish in a thermally insulated vessel. Especially, since a modern phase Doppler anemometry system was available in the last year, followings were revealed.

- (1) For smaller droplets less than 10 micro-meter of the Sauter mean diameter (SMD) produced by a humidifier and a nebulizer, the newest phase Doppler anemometer gives more droplets less than 2 micro-meter than the direct freezing sampling method. This must be due to the improvement or the progress of the phase Doppler anemometer system. However, there was pretty well consistency of droplet size distribution for droplets greater than 2 micro-meter between this simple direct freezing sampling method and the newest phase Doppler anemometer. This verifies the practical validity of this simple freezing method.
- (2) For larger droplets more than 50 micro-meter of SMD for a hollow cone spray produced by a swirl nozzle, the droplet size distribution of the direct-freezing sampling method shifted to greater size than that of the newest phase Doppler anemometer. It would be due to the limited dynamic range for the newest phase Doppler anemometer, which must be a great advantage of this freezing method.
- (3) Thus, this direct-freezing sampling method has better performance of smaller droplet measurement than a conventional phase Doppler anemometer but has inferior than a newest one. It has better dynamic range than both phase Doppler anemometers.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：内燃機関工学，液体の微粒化

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：(1) 噴霧，(2) 微粒化，(3) 粒径計測，(4) 凍結，(5) 微小粒子，(6) ダイナミックレンジ，(7) 直接サンプリング，(8) ノズル

1. 研究開始当初の背景

液体の微粒化技術は少ないエネルギーでできるだけ小さくしかも，場合によってはできるだけ均一な粒径を得ることが目的である。そのためには粒径計測が重要である。現在主流となっている，位相ドップラー法や前方微小角散乱法などの光学的方法には以下の問題がある。

- (1) 測定値の信頼性を評価することが難しい，
 (2) 数 μm オーダーの微小粒子まで精度よく計測することができない，
 (3) 高濃度での計測ができない。

これらの問題を解決する方法として，申請者はかつて液体窒素凍結法の開発に参画した。これは，直径 1000mm，高さ 3000mm ほどの密閉容器内部を液体窒素から気化した低温の窒

素ガスで満たし、そのなかに任意の噴霧を形成して凍結させ、凍結した粒子をネガフィルム上に採集して影写真を撮影するというものであった。その結果以下のことが明らかとなった。

- (1) 水、燃料油（ガソリン、軽油）を問わず凍結ができ、しかも球状となり、粒径計測ができる、
- (2) $5\mu\text{m}$ 以下の微細な噴霧群がきわめて多く存在し、それらは位相ドップラー法、前方微小角散乱法のいずれでも検出が容易ではない、
- (3) 位相ドップラー法、前方微小角散乱法のダイナミックレンジの制約から、 $100\mu\text{m}$ 以上の巨大な粒子を取り逃がすことが多い。つまりこれらの光学的計測法は、微小粒子も巨大粒子もともに取り逃がす。

このように、凍結法は粒径の絶対値を計測する方法としてきわめて有効であることがわかった。

一方、申請者らは極限の微粒化をめざしたいくつかの研究を実施してきている。一つは壁面衝突を利用した液膜微粒化に基づく方法（平成 18, 19 年度科研費採択テーマ）であり、もう一つは $10\mu\text{m}$ 以下の微細なノズルを用いた方法（平成 17, 18, 19 年度民間等との共同研究テーマ）である。これらは、圧力微粒化の限界と超音波微粒化の限界を知るための研究で、ガウ-平均粒径で $10\mu\text{m}$ 以下になろうとしている。したがって粒径分布としては $5\mu\text{m}$ 以下の粒子も数多く存在していると推察され、このように小さな粒子は光学的方法によって十分な精度で計測することは困難である。

光学的計測の困難さは、高密度雰囲気における噴霧粒径計測においてもきわめて深刻である。とくに、ガスタービン、ディーゼルエンジン、シリンダ内直接噴射ガソリンエンジンにおいては、燃料の微粒化特性がきわめて重要で、近年とくに大きな問題となっているナノ微粒子排出にも微粒化が大きく影響する。それにもかかわらず、高密度雰囲気においては噴霧の広がり制限されてしまうために、光が届かない、または光を検出できない、ということになってしまい、いかなる光学的計測も使えない。

2. 研究の目的

上記の背景の下に、本研究では以下を目的とする。

- (1) 可搬式凍結プローブ粒径計測装置の開発を行う、
- (2) 同装置によって、いくつかの極限微粒化

手法の粒径計測を行い、位相ドップラー法と前方微小角散乱法との比較計測を行う、

- (3) 同装置によって、密閉容器中に実現した高密度雰囲気中に噴射した噴霧計測を行う。

3. 研究の方法

平成 21 年度 可搬式凍結プローブ粒径計測装置の試作

【特徴】

$\Phi 35\text{mm}$ 、長さ 300mm のプローブを 2 重円管としたプローブ式粒径計測装置を試作する。拡大撮影部には、デジタルマイクロスコープ（現有；最高倍率 5000 倍）を用いる。本装置は以下の特徴を持つ。

- (1) 本装置は液体窒素供給部（重力式）と吸引ポンプ（シロッコファン程度の低負圧吸引）に接続するだけで任意の噴霧を凍結させることができ、サンプルは吸引速度減衰部で直接観察される。したがって、いかなる噴霧であつてもどのような場所であつても測定が可能であるとともに、凍結粒子が観察中に融解することなく撮影できる。
- (2) 冷却用の液体窒素はサンプリングプローブの周辺から供給され、噴霧群とプローブ先端で混合吸引される。したがって、噴霧はプローブ中で凍結を完了することができ、プローブ中での蒸発や合体などの影響を最小限にとどめることができる。
- (3) 本プローブを 高密度雰囲気に適用する場合、吸引ポンプをはずしてそこに吸引量調整弁を取り付けるだけで使用できる。ただし、液体窒素供給用ポンプ（現有）を要する。

これらの特徴が実際に十分発揮できるかどうかの検証がまず必要である。そのために、対象として微小な粒径でしかも安定して供給できることから、加湿器の水噴霧を用いる。この噴霧は濃度も制御でき、光学的計測データも豊富である。さらに、従来の凍結法では計測値に対する誤差要因が少ないであろうことは推察できたものの、その実証を行っていなかった。

平成 22 年度 プローブ式凍結法による粒径計測装置と光学的方法の比較

【燃料噴霧の計測】

申請者がかつて実施した凍結法で使用した

と同一スペックの噴射弁（ディーゼルエンジン用高圧噴射弁）を用いて、当時とほぼ同一の条件である、燃料噴射圧力 8-12MPa、ノズル噴口径 0.3mm、噴射期間 90ms、供試液体を水および α メチルナフタレンについて計測した当時の結果との比較を行う。

【高いニーズの噴霧計測】

次に、本装置を用いて、微粒化特性の優れた壁面衝突噴霧とマイクロノズルアレイを用いた超音波噴霧の粒径計測を行う。

平成 23 年度 可搬式凍結プローブ粒径計測装置の小型化と高密度霧雰気での計測

【小型化の検討】

本 1 号機は製作のしやすさを念頭に設計、製作しつつあるものであるが、現象への影響を考えるとさらなる小型化が必要である。したがって、本装置によって凍結が可能であり、所期の性能を有することが確認された段階で、外径を約半分とした $\Phi 15\text{mm}$ 程度の小型プローブの試作を行う。

【高密度霧雰気の計測】

圧力容器中に生成した噴霧を同プローブによってサンプリングし、粒径に対する霧雰気密度の影響を明らかにする。広安ら以来行われていない霧雰気密度の影響が、通常の液体に対して明らかにされる。このとき、液体窒素ポンプ（現有）によって加圧供給を行い、サンプリング部を含めて圧力容器とする。

4. 研究成果

プローブ式凍結法を考案し、装置製作、微小粒子を生成できる加湿器（超音波振動子型）やネブライザー（数万個の微小ノズルと超音波振動子の組み合わせによる医薬吸引器）の噴霧に対して適用した。その結果以下のことが明らかとなった。

- (1) プローブ式凍結法を用いて、球状の凍結粒子を生成することができ、粒子計測への適用が可能である。
- (2) プローブ式凍結法を用いることで、蒸発や合体の影響が常温の噴霧に比べて小さい条件での計測が実現できると解釈されるいくつかの物理現象が明らかとなった。
- (3) 従来型位相ドップラー法や前方微小角散乱法に比較して、 $10\mu\text{m}$ 以下の微小粒子分布が高いことから、これらの微小粒子計測に適しているという大きな特長がある。

しかしながら、プローブ式凍結法では、常温の噴霧の一部をプローブ内に導入して凍結させるため、そのままの瞬間写真では、1000倍以上の高拡大率において被写界深度が著しく低下してしまい、1枚の画像で計測可能な粒子数は平均5個程度と少なく、データレートの低さという問題の存在が明らかになった。この問題を解決するために、直接凍結サンプリング法を開発した。これは、プローブではなく、断熱容器に入れた受け止め皿に直接に噴霧を導入するという方法である。とくに、位相ドップラー法との比較検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (4) 比較的粒径の小さいザウター平均粒径 (SMD) $\leq 10\mu\text{m}$ の加湿器やネブライザーでは、 $2\mu\text{m}$ 以下の粒子分布において直接サンプリング法の分布のほうが小さくなる。これは、新たに導入した最新式の位相ドップラー法のシステムが、 $10\mu\text{m}$ 以下の微小粒子計測の精度を向上させた最新式のものであることが大きな理由であると考えられるが、それ以上の粒子分布はおおむね同一であり、直接サンプリング法という簡便な方法であっても十分実用に供すことのできる事が明らかとなった。
- (5) 比較的粒径の大きなSMD $\geq 50\mu\text{m}$ を持つ中空噴霧（スワール式ノズルで生成）においては、直接サンプリング法の粒径分布は位相ドップラー法よりも大粒径側に顕著にシフトした。これは、位相ドップラー法のダイナミックレンジの狭さゆえと考えられ、大きな特長といえる。

以上のことから、微小粒子計測における利点は従来の位相ドップラー法よりは優れるが、最新式のものよりは劣ること、ダイナミックレンジの広さは証明された。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 2 件）

- (1) Jinyin ZHU, Zheng LI, Mikiya ARAKI, Seiichi SHIGA, A Freezing Sampling Method to Measure Droplet-Size, Proceedings of the 15th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System-Asia, Pintung (Taiwan), October 19th-21st, 2011, p.185-p.187.
- (2) Yuki YAMAGUCHI, Zheng LI, Mikiya ARAKI, Seiichi SHIGA, Measurement of Droplet Size Distribution by Using a

Liquid Nitrogen Freezing Sampling Probe, CD Proceedings of 19th Symposium on Liquid Atomization, December 21-22, 2010, Tokyo, Japan, 5 pages.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

志賀 聖一 (SHIGA SEIICHI)

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00154188

(2) 研究分担者

荒木 幹也 (ARAKI MIKIYA)

群馬大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70344926

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号：