

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630048

研究課題名(和文)クヌッセンポンプを用いたPM2.5濃度計測装置の開発

研究課題名(英文)Development of PM2.5 sensing system with Knudsen pump

研究代表者

新美 智秀(Niimi, Tomohide)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70164522

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、温度差のみにより駆動されるクヌッセンポンプを構築し、基礎特性を調査した上で、多孔質膜における上・下流の圧力差から多孔質膜上に堆積した微小粒子の量を計測するCAMM法を組み合わせることによって、小型で可搬かつ安価で操作性も良いPM2.5濃度計測手法及び装置の開発を行うことを目指した。その結果、多孔質膜の孔径や重ね方によってクヌッセンポンプの特性が変化する可能性を明らかにした。一方で、多孔質膜上に微小粒子を捕捉するためには更なる性能向上が必須である。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have aimed to develop a small, portable, inexpensive and easy to handle PM2.5 sensing system. The system is composed of a temperature-driven Knudsen pump, and the concentration of particles is measured by the CAMM technique from the pressure difference between up- and downstream of a porous membrane. By using multiple membranes of different porous radius, it is indicated that the pressure difference and flow rate is improved. However, further improvement is required to capture particles on a membrane by using the Knudsen pump.

研究分野：流体工学

キーワード：希薄気体力学 熱遷移流 クヌッセンポンプ 環境計測

### 1. 研究開始当初の背景

大気環境における浮遊粒子状物質 (SPM) による健康への影響は以前から懸念事項の一つとなってきた。そして、経済発展に伴う大気環境の悪化が指摘されてから、工場における排気の改善や 2003 年よりディーゼル車運行規制条例などの実施により、環境基準の達成状況は近年改善傾向にある。しかし、その一方で国境を越えた影響も現れ始めており、以前は特に春先に観測される黄砂が話題となっていたが、近年では近隣諸国における経済発展による影響と考えられる SPM の中でも特に小さい微小粒子状物質 (PM<sub>2.5</sub>) という単語が頻繁に報道されるようになり、大気環境に関する関心が非常に高まるとともに、微小粒子が持つ疫学的な危険性についても注目が集まっている。特に PM<sub>2.5</sub> のように粒径の小さい微小粒子は除去することが容易でない上に、肺の奥深くまで入りやすいため、呼吸系だけでなく循環器系も含めてその影響が不安視されている。

この PM<sub>2.5</sub> はその名前が示す通り大気中に浮遊する粒子状物質のうち粒径が 2.5 $\mu\text{m}$  で 50%分粒されたもののうち小さい粒径側の微小粒子である。大気環境中の PM<sub>2.5</sub> 濃度分布は、フィルタ法と呼ばれる一定時間に PM<sub>2.5</sub> ロウポリウムエアサンプラを用いて多孔質膜上に採取された微小粒子の質量を計測する標準化された手法を用いて、気象観測と同じように地方自治体の観測地点において観測されている。そのため、科学的な見地では地点間や過去のデータと直接比較することが可能となる。なお、標準化手法においては試料大気導入口の高さが周囲の影響を受けないように一般に 3m から 10m の間に設定されており、観測装置の規模は非常に大きいものである。このような科学的な計測は非常に重要で有意義である一方、あくまでも地域の代表値であり、個々人レベルが実際の生活を通して晒される PM<sub>2.5</sub> 濃度とは異なっている。特に大きな建造物や河川などの周囲環境によって局所的な濃淡分布が生じることは容易に想定されるため、PM<sub>2.5</sub> 対策という意味合いではまだまだ不十分である。そのため、大気環境による健康被害を避けるためには、個々人で容易に計測できる、精度は高くなくとも安価な PM<sub>2.5</sub> 濃度計測装置の開発が必要不可欠である。このような計測装置が開発されれば、従来の地域単位による天気情報では実際に自分がいる場所の天気と異なるという不満をインターネットによる情報提供により補完することで解消したピンポイント天気情報のようにピンポイント PM<sub>2.5</sub> 濃度計測が実現できる可能性がある。なお、計測装置を最も大型化させ、またメンテナンスを必要とさせる要素としては、大気のサンプリングに用いるポンプが挙げられる。そのため、計測装置の実現のためには適切なポンプの開発が重要な要素となる。

### 2. 研究の目的

小型で可搬、かつ安価な PM<sub>2.5</sub> 濃度計測手法及び装置の開発を行うことを本研究の目的とする。特に装置の中で最も大型になるのは大気をサンプリングするためのポンプとなることが想定されるため、ポンプを重点的に開発する。

ポンプとして、本研究ではクヌッセンポンプに着目した。クヌッセンポンプとは、気体分子が他の気体分子と衝突する間に平均的に移動する距離である平均自由行程と同等程度の小さい径の微細流路によって温度差のある 2 つの容器を接続すると低温側から高温側に流れが発生する熱遷移流という現象を利用したポンプである。特徴としては温度の制御のみで稼働するため、可動部がなく故障しづらい上に、小型化も容易である。一方で流量が少なく、発生させる圧力差も小さいという問題点もある。

計測手法としては、現在開発が進められている CAMM (Continuous Ambient Mass Monitor) 法に着目する。この手法は、多孔質膜に粒子が堆積することによって圧力損失から多孔質膜上・下流の圧力差が大きくなることを利用し、圧力差の時間変化から堆積した粒子量を計測する。差圧計のみで計測できることから装置の小型化が期待できる。

ポンプ、そして計測手法どちらにおいても  $\mu\text{m}$  程度の径を持つ多孔質膜を利用するという共通点があるため、この 2 つの手法を組み合わせることで、小型で可搬、かつ安価だけでなく故障の可能性も少なく操作性の良い PM<sub>2.5</sub> 計測装置の実現を目指す。

### 3. 研究の方法

PM<sub>2.5</sub> 濃度計測を実現するためには、重要な構成要素であるクヌッセンポンプの基礎的な特性が重要となる。そこで、特にポンプとしての重要な要素である多孔質膜の性質による影響を調査する。クヌッセンポンプは、温度の異なる 2 つの空間を平均自由行程と同等程度の微細流路でつなぐことによって構成する。ただ、ポンプの流量は微細流路の断面積によって決まるため、多くの流量を流すためには流路の本数を増やす必要がある。そのため、孔径が小さい多孔質膜や多孔質体が微細流路群として利用されることが多い。本研究においても、大気を吸引して含まれる微小粒子を計測するためには、計測誤差を減らすためにも流量が必要となることが想定され、多孔質材料の微細流路を用いることが適切であると考えられる。しかし、多孔質材料における孔径分布や材質、厚さ、利用する枚数などがポンプの特性に与える影響はこれまでの知見では十分明らかになっていない。言い難い。そこで、まずはクヌッセンポンプの基礎特性の調査のために簡便でかつ容易に再現可能なポンプを既製品により構築する。そして、多孔質材料の流路として様々なものを使い、その特性を調べる。特に、同

じ平均孔径，材質，厚さであっても製造元によって性能が異なるということも想定される．そのため，最終的なポンプとしての性能を決定づける多孔質材料の性質を解明することも試みる．

引き続き，CAMM 法についての調査も行う．CAMM 法は，多孔質膜上に微小粒子が堆積することによって変化する圧力損失，つまり上・下流の圧力差を調べることによって堆積した微小粒子の量を計測する手法である．そのため，用いる多孔質膜によって較正曲線が大きく左右されてしまう可能性が高い．そこで，クヌッセンポンプを利用し，実際に微小粒子を多孔質膜に堆積させて上・下流の圧力差を計測しながら，その特性を調査する．まずは既知の粒径を持つ微小粒子を用い，堆積させた微小粒子量と圧力差の関係を計測する．様々な種類の多孔質膜を用いて計測を行い，多孔質膜の持つ特性と生じる圧力差との関係性を調査する．圧力差の変化が大きければ感度は良くなるが，多孔質膜中に微小粒子が堆積してしまうため，連続計測には適さず，短時間での多孔質膜の交換が必要になる．一方で，圧力差の変化が小さければ，長時間計測に向いていると言える．

これらの調査の結果をまとめ，特にCAMM 法で用いるために適したクヌッセンポンプの開発を行う．また，実際に適用することを考え，現実的な温度差を設定し，計測装置の可搬性も考慮しながら，できるだけ効率よくその温度差を実現する加熱，冷却手法についても検討する．そして，最終的にCAMM 法による微小粒子量の計測装置の開発を目指す．まずは，既知の粒径を持つ微小粒子を供給して，堆積された微小粒子量をモニターしながらCAMM 法による計測を実施し，精度の検証を行う．ただ，その際にはCAMM 法とクヌッセンポンプを同時に実現する必要があり，多孔質膜をどのように利用するかが問題となる．両方の性能を満たす特性を持つ多孔質膜がある場合には1枚だけを利用することによって実現できる可能性がある．その場合は，温度差によって圧力が変化してしまうことから直接的にはCAMM 法を利用できないため，対応が必要になる．しかし一方で，多孔質膜が1枚で済むことより，メンテナンスや装置そのものの簡素化も行えることが利点となる．しかし，場合によってはうまく機能しないことも想定されるため，それぞれの機能を実現する別々の多孔質膜を利用してCAMM 法とクヌッセンポンプを同時に実現する方法も検討する．これらのいくつかの問題を克服していきながら，より簡便かつ安価で，精度も許容できる程度であるPM2.5 濃度計測装置の開発へとつなげていく．

#### 4．研究成果

本研究では，温度差のみにより駆動されるクヌッセンポンプを構築し，基礎特性を調査

した上で，多孔質膜における上・下流の圧力差から多孔質膜上に堆積した微小粒子の量を計測するCAMM 法を組み合わせることによって，小型で可搬かつ安価で操作性も良いPM2.5 濃度計測手法及び装置の開発を行うことを目指した．

まず，クヌッセンポンプの基礎特性の調査を行った．クヌッセンポンプは温度の異なる2つの空間を平均自由行程と同程度程度の微細流路でつなぐことによって構成される．ただ，微細流路では流量が非常に小さくなってしまいうため，ポンプとしての流量性能を出すには流路の本数を増やす必要がある．そこで，孔径の小さい多孔質膜を微細流路群として採用した．そして，汎用真空部品を組み合わせることによって，多孔質膜が容易に交換可能な簡便な構造のクヌッセンポンプを製作した．超高真空用のフランジを利用することにより，真空グリスの塗布など特別な対応をとらなくとも漏れの無いクヌッセンポンプを製作することに成功した．ただ，多孔質膜は交換のたびに破損してしまうことから，ガスケットを利用することにより大きな破損が起きないように改良した．製作したクヌッセンポンプを用い，多孔質膜の孔径や重ねる枚数を変化させ，ポンプとしての基礎的な特性である流量と差圧の関係性を調査した．そして，流量と差圧のモデル関係式を実験結果はよく満たしていること，適切な孔径と重ねる枚数を選択することで様々な性能が得られることを確認した．さらに，異なる孔径の多孔質膜を重ね合わせた場合には，重ね方によって特性が変化する可能性が示された．このことは低温側と高温側の間をつなぐ流路の径が変化する場合には径の変化の仕方により流れやすさが変わる可能性があることを示唆している．しかし，一方で定量的な評価を行うには十分な精度が無いという課題も見つかった．

また，環境中の微粒子に対する捕捉性能も調査した．しかし，CAMM 法を実現する以前に，ポンプとしての性能不足により，多孔質膜上への微粒子の堆積は確認できなかった．そのため，クヌッセンポンプの更なる性能向上が必須であることが判明した．この際に，異なる孔径の多孔質膜の重ね合わせが有効となる可能性がある．また，クヌッセンポンプと微粒子の捕捉部を分離し，それぞれで最適な多孔質膜を利用するなど，装置全体の設計も再度行っていく必要がある．

#### 5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計0件)

〔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〕

なし

6 . 研究組織

(1)研究代表者

新美 智秀 ( NIIMI TOMOHIDE )  
名古屋大学・工学研究科・教授  
研究者番号 : 70164522

(2)研究分担者

山口 浩樹 ( YAMAGUCHI HIROKI )  
名古屋大学・工学研究科・准教授  
研究者番号 : 50432240