

神奈川工科大学

環境科学技術研究所

研究報告

第 5 号

2025 年度

研究推進機構

目次

- ・浮遊ウイルス捕集装置の開発

瑞慶覧章朝

- ・環境水中の硝酸イオンの新規簡易分析法の開発

高村岳樹

浮遊ウイルス捕集装置の開発

研究者名：瑞慶覧 章朝

1. 研究の目的

本研究では、空気中に浮遊するウイルスを捕集するために、湿式コロナ放電型ウイルス捕集装置を考案した。高電圧印加用電極には、発生オゾン濃度が低いカーボンファイバーブラシを使用し、接地電極には再飛散が抑制できる水電極を採用した。そして、大気じんおよび浮遊ウイルスの捕集性能を検討したので報告する。

2. 研究の必要性及び従来の研究

医療や食品の分野では殺菌技術は重要であり、近年では新型コロナウイルスの流行や健康意識の向上から、家庭における空気清浄機への関心も高くなっている。従来のウイルスや菌の不活性化方法として、高圧水蒸気、酸化エチレンガス、放射線、オゾン、マイクロ波、放電プラズマ利用がある。しかし、いずれの方法も、経済性、安全性、効果の観点から居住空間における空気清浄には適さない。これに対して、室内に外気を取り込む換気対策があるが、空調エネルギーが莫大となる。サイクロンやスクラバなどの空気浄化装置は、原理的・実験的にも PM2.5 やウイルスサイズの粒子はほとんど除去できない。ヘパフィルタは、目詰まりによる能力低下や消費電力が大きい問題がある。

3. 期待される効果

本研究目的が達成されれば、消費電力、オゾン発生量、再飛散が少なく、メンテナンスが容易な高性能空気浄化装置が実現できる。例えば、船内、病院、学校や地下鉄ホームなど、多くの人が集まる空間の空気浄化に利用できる。空気中の PM2.5、細菌類やウイルスなどを除去及び不活性化し、SDG's Target 3.9 やカーボンニュートラルに貢献できる。

4. 研究の経過及び結果・評価

実験装置の概要を図 1 に示す。装置は、ダクト、コロナ放電部、ポンプ(メーカー:日東工器 型式:VC0301B-A1)で構成した。コロナ放電部は高電圧印加用ブラシ電極と接地用水電極からなるブラシ対水電極構造とし、電極間隔は 10 mm とした。ブラシ電極(メーカー:ケンエー)はカーボン製であり、直径 6 μm のファイバーが 6000 本の束になっている。また、容量 335 ml のタンクに純水、生理食塩水またはリン酸緩衝生理食塩水(PBS)を 325 mL 入れ水電極とし、電極間に最大 12 kV の正極性直流電圧を印加した。装置下流側から流通ガスの一部を吸引し、オゾンモニター(メーカー:荏原実業 型式:EG-2001D)によって発生オゾン濃度

を測定した。模擬粒子は大気じんとし、装置内風速を 0.1 m/s ～ 0.4 m/s の範囲で調整して流入させた。コロナ放電部上流及び下流側ダクトから流通ガスの一部を吸引し、パーティクルカウンタ(メーカー:RION 型式:KC-01D)を用いて粒径 0.3 μm ～ 5 μm の範囲で粒子個数濃度を測定した。また、模擬ウイルス Qβ ファージ(NBRC20012)を含んだ空気を風速 0.2 m/s で装置内に流入させた。上流及び下流側ダクトから流通ガスの一部をポンプによって流量 2 L/min で吸引し、洗浄瓶内の PBS に浮遊ウイルスをサンプリングした。その後、PBS 内のウイルス濃度をプラークアッセイ法によって測定し、浮遊ウイルス濃度をもとめた。そして、(1) 式を用いて、減少した粒子個数濃度またはウイルス濃度の割合である捕集率を評価した。

$$\eta = 1 - \frac{N_{out}}{N_{in}} \quad (1)$$

ただし、 N_{in} 、 N_{out} はコロナ放電部上流及び下流側の粒子個数濃度あるいはウイルス濃度である。

各風速における電圧電流特性を図 2 に示す。水電極の溶液は純水とした。いずれの風速においても、コロナ放電開始電圧は約 4 kV であり、電圧の増加に対して電流値も増加した。

発生オゾン濃度と電圧の関係を図 3 に示す。いずれの風速においてもコロナ放電開始電圧付近からオゾンの発生が検出され、電圧が大きくなるほどオゾン濃度も増加した。これは、コロナ放電電流が増加することで、酸素の解離が促進されるためである。また、風速の増加に

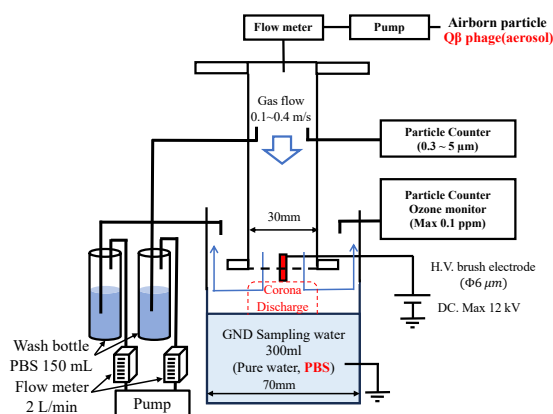


図 1．実験装置の概略

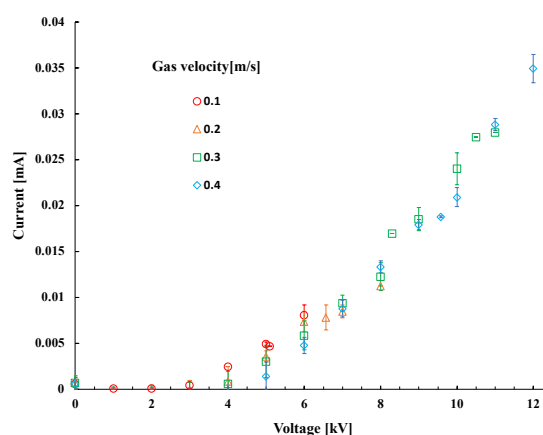


図 2．各風速における電圧電流特性

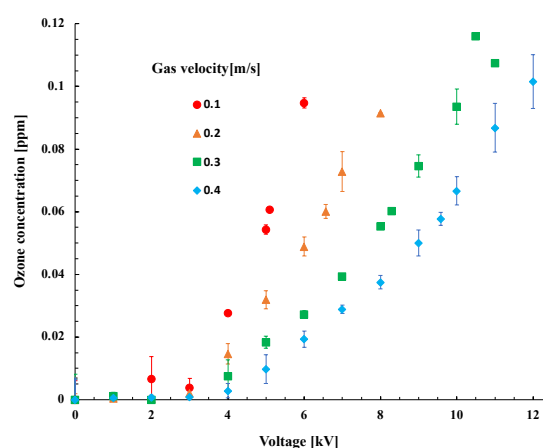


図 3．発生オゾン濃度と電圧の関係

ほぼ反比例して、同一電圧におけるオゾン濃度が低下した。これは、オゾン発生量が一定であるのに対して、流入空気量が増えるためである。

各風速における捕集率の電圧特性を図4に示す。模擬粒子は大気じんであり、粒子濃度の測定にはパーティクルカウンタを用いた。捕集率は、いずれの風速においても電圧の増加に伴い向上した。また、風速の低下に伴って同一電圧における捕集率が向上した。風速 0.2 m/s において、印加電圧 9 kV で捕集率 78% を達成した。しかし、このときのオゾン濃度は 0.1 ppm であった。空気清浄協会が定めるオゾン濃度 0.05 ppm 以下を考慮するとオゾン濃度 0.02 ppm、電圧 5 kV で 50% 程度の捕集率となる。以上のことから、低オゾン濃度条件におけるさらなる捕集率向上が必要といえる。

捕集率の電圧特性に対する水電極の種類の影響を図5に示す。風速はいずれも 0.2 m/s である。捕集率は、いずれの水溶液においても、電圧の増加に伴い向上した。捕集率の最大値は、生理食塩水では電圧 8 kV で 74%、PBS のとき 9.6 kV で 70% であった。純水のときの 9 kV で 78% と比較すると、大きな差はなかった。以上のことから、本研究の条件では、捕集性能に対する水電極の種類の影響は小さいといえる。

浮遊ウイルスの捕集率と印加電圧の関係を図6に示す。図中には、図4における風速 0.2 m/s 時の大気じんの捕集率も示してある。浮遊ウイルスの捕集率は電圧無印加時において 26% であった。これは機械捕集の効果である。捕集率は、

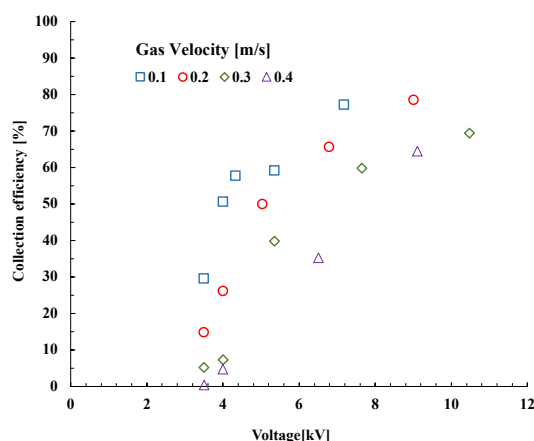


図4．各風速における捕集率の電圧特性

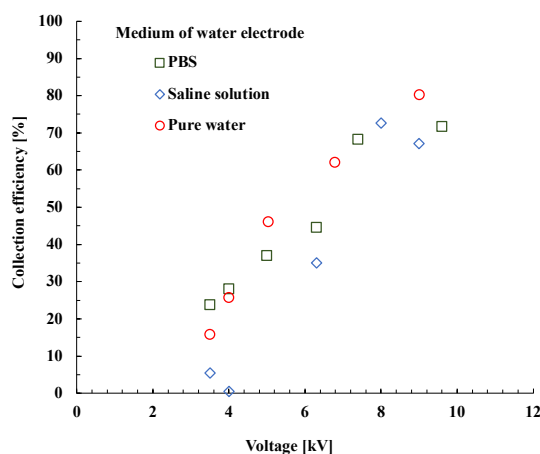


図5．捕集率の電圧特性に対する水電極の種類の影響

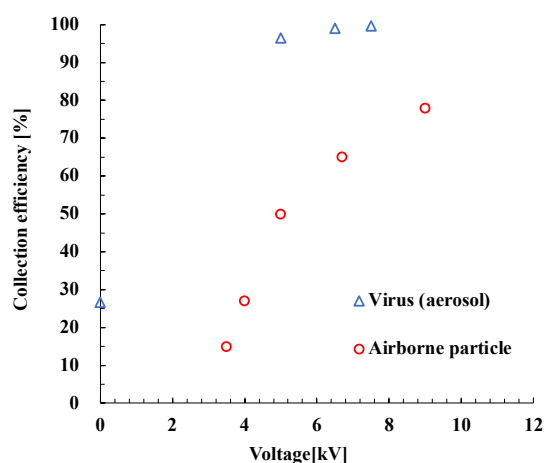


図6．ウイルスの捕集率と電圧の関係

電圧の上昇に伴い向上し、6.5 kV 以上で 99%を達成した。大気じんの結果と比較して、浮遊ウイルスの捕集率の方が高くなった。これは、ウイルスのみを評価するプラークアッセイ法に対して、パーティクルカウンタによる計測はウイルス以外の粒子も計測するためである。

5. 今後の計画

空気中に浮遊するウイルスを捕集するために、湿式コロナ放電型ウイルス捕集装置を考案し、大気じんおよび浮遊ウイルスの捕集性能を検討した。その結果、次のことが示された。

- ① 風速 0.1 m/s から 0.4 m/s の範囲では、コロナ開始電圧は約 4 kV であり、電圧が大きくなるほど放電電流も増加した。
- ② いずれの風速においても、電圧の増加に対してオゾン濃度は増加し、風速の増加にほぼ反比例してオゾン濃度が低下した。
- ③ 大気じんに対する捕集率は、電圧の増加、風速の低下に伴い向上した。
- ④ 風速 0.2 m/s において印加電圧 9 kV で捕集率 78%を達成した。このときのオゾン濃度は 0.1 ppm であった。
- ⑤ 捕集率の最大値は、水電極が生理食塩水の時電圧 8 kV で 74%、PBS のとき 9.6 kV で 70%であり、純水の時 9 kV で 78%と同程度であった。
- ⑥ 本装置によって浮遊ウイルスを水電極内に捕集できていることが示された。浮遊ウイルスの捕集率は、印加電圧 6.5 kV 以上で 99%を達成した。

以上のことから、湿式コロナ放電によって浮遊ウイルスを捕集できることが明らかとなったが、発生オゾン濃度の抑制、消費電極の抑制、処理風量の増加が今後の課題といえる。これらに対して、放電電極の構造の改良、または高電界の利用を検討していく予定である。

6. 研究成果の発表

<査読付き学術論文>

- (1) Akinori Zukeran, et al, Reduction of ozone generation and durability of discharge electrode in an electrostatic precipitator with carbon brush disk electrode, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 61, No.3, pp. 4266-4273, 2025

<国際会議発表>

- (1) Mio Kitamura, et al., Effect of repetition frequency of DC-biased nanosecond pulse voltage on particle trajectory and collection efficiency in an electrostatic precipitator, 10th East Asia Joint Symposium on Plasma and Electrostatic Technologies for Environmental Application (EAPETEA-10), 3-5 December, 2025, Kumamoto, Japan

<国内学会発表>

- (1) 座間滉人など、湿式コロナ放電を用いたウイルスサンプリング装置の捕集特性, 令和 8 年電気学会全国大会, 2025

環境水中の硝酸イオンの新規簡易分析法の開発

研究者名：高村岳樹

1. 研究の目的

本研究は、環境水中に含まれる硝酸イオン (NO_3^-) を、分析現場（オンサイト）において迅速、簡易、かつ正確に定量できる新たな分析手法を確立することを目的とする。具体的には、従来の公定法で用いられている有害なカドミウムの代替として、環境負荷が低く安全な塩化バナジウム(III)を還元剤として導入し、微量サンプル（小スケール）での定量性と再現性を検証する。さらに、現場での操作フローを劇的に簡略化するため、ポリビニルアルコール（PVA）をマトリックスとしたコンパクトな亜硝酸検出用ハイドロゲルの作成条件を最適化し、ポータブル吸光光度計（PiCOEXPLORER）と組み合わせることで、実験室外でも即座に高精度な測定が完結するシステムの構築を目指す。

2. 研究の必要性及び従来の研究

近年の近代農業における過剰な施肥や家畜排泄物の不適切な処理、さらには生活排水の浸透など、人為的な要因によって環境水中、特に地下水や湧水中の硝酸イオン濃度の上昇が深刻な問題となっている。一部の地域では、環境基準値である 10 mg/L（湧水等における継続モニタリング指標）を大幅に超過する事例が増加しており、過去の全国地下水質の概況調査でも約 6%の地点で超過が確認されている。環境水中に過剰に存在する硝酸イオンは、閉鎖性水域における藻類の異常繁殖を誘発し、富栄養化による水質汚濁や水生生態系への壊滅的な被害をもたらす。また、公衆衛生の観点からも、高濃度の硝酸イオンを含む飲料水の摂取は乳児のメトヘモグロビン血症（ブルーベビー症候群）の直接的な原因となる。これは、摂取された硝酸イオンが体内の微生物により亜硝酸イオン (NO_2^-) へと還元され、血液中のヘモグロビンと強固に結合することで、酸素運搬能力を奪い細胞性窒息を引き起こす致命的な疾患である。したがって、河川や湧水、地下水の環境モニタリングを継続的かつ多地点で実施することは、環境保全および公衆衛生の双方において極めて重要である。しかしながら、日本工業規格（JIS K 0102）等に定められている現行の公定法「銅-カドミウム還元蒸留法」または「銅-カドミウム還元法」には、運用上の重大な課題が存在する。この手法は、高価かつ精緻なガラスカラムにサンプルを通液させる必要があり、大量の試料水を消費する。また、装置のセットアップや測定に多大な時間を要するだけでなく、極めて毒性の高い有害物質であるカドミウムを大量に使用する。そのため、実験従事者の安全確保（毒性曝露リスクの回避）や、実験後の廃液・廃棄物処理に莫大なコストと手間が強いられている。このような背景から、世界的に「カドミウムフリー」かつ「オンサイト対応」の新規迅速定量法の開

発が強く望まれていた。本研究によって安全な代替還元剤や固体ゲル試薬、モバイル計測技術を統合したシステムが確立されれば、以下のような多大な効果が期待される

3. 期待される効果

劇物であるカドミウムを一切排除し、微量スケール化によって試薬消費量と廃液量を最小限に抑えることで、実験室の安全確保と環境負荷の低減、廃棄コストの劇的な削減を同時に達成する。

サンプル採取場所でその場で即座に結果（3分～30分以内）が得られるため、地下水汚染や河川の異常な富栄養化が発生した際、迅速に遡上調査を行い汚染源をピンポイントで特定することが可能となる。

複雑な実験装置や特殊な廃液処理設備を必要としないため、専門の検査機関だけでなく、地方自治体や市民ボランティアによる流域水質調査、さらには小中学校・大学における環境教育・体験学習の教材としても広く普及・活用できる。

4. 研究の経過及び結果・評価

現場での液体試薬の分注作業を完全に無くすため、発色試薬をあらかじめハイドロゲル内に包括させた固体テストキットの作成を試みた。200 mLの広口ビーカーに純水 100 mLを満し、スターラーを用いて 80℃に加熱した。攪拌子を 1200 rpm で高速回転させながら、PVA（ポリビニルアルコール）顆粒 1 g をダメにならないよう極めて少量ずつ添加した。溶解中に塊が底に焦げ付いたり攪拌子に絡みついたりするため、薬さじを用いて慎重に剥がしながら完全に溶解させた。室温まで 30 分静置冷却した後、調製した高濃度グリース試薬 7.5 mL と、架橋剤としてポリエチレングリコールジグリシジルエーテル (EGDE) 50 μL を添加し 1 分間攪拌した。この粘性の高い混合液を 400 μL ずつ 24 ウェルプレートに正確に分注し、24 時間冷凍庫で凍結融解 (Freeze-Thaw) させることで白濁した弾力のある均一な測定用ハイドロゲルを得た。

各濃度の標準亜硝酸溶液 1 mL を入れた 1.5 mL エッペンチューブに、作成したゲル 1 個を直接投入し静置した。ゲルは溶液中の亜硝酸イオンを速やかに吸蔵し、即座に鮮やかなピンク～赤紫色へと呈色した。わずか 3 分間で反応が平衡に達した後、溶液（またはゲルから浸出した呈色液）300 μL を測定用チューブに移し、PiCOEXPLORER (540 nm) で計測した。3 回の測定データを以下の表に示す。ゲルを用いた分析では、液体試薬を現場で一滴ずつ滴下する手間が省け、サンプルにゲルを「ポンと放り込むだけ」という究極の簡略化を達成した。反応時間はわずか 3 分と驚異的に短く、表 3 が示す通り 3 回反復において良好な直線関係（検量線）を描き、実用に耐えうる高い定量性能を持

表 亜硝酸イオン濃度と吸光度

亜硝酸イオン濃度 (mg/mL)	平均吸光度
0.00	0.000
0.25	0.072
0.50	0.1533
0.75	0.235
1.00	0.311

つことが確認された。また、特筆すべき副次的発見として、このゲルを未反応のまま空气中に放置（2週間程度、あるいは凍結乾燥後露出）すると、溶液反応時と同様の赤紫色の呈色を示す現象が見出された。これは空气中に微量に存在する窒素酸化物（NO_x）がゲル表面の水膜に溶解・反応している可能性が極めて高く、この特性を逆手にとることで、設置するだけで大まかな環境大気中の NO_x 濃度をパッシブにスクリーニングできる「大気・水質双方へのデュアル簡易センサー」へと発展させられる学術的・実用的ポテンシャルが示唆された。

5. 今後の計画

PVA ゲル試薬とのマッチングを最優先し、ゲルの呈色を阻害しない別の常温還元系の導入を試みる。具体的には、毒性がなく取り扱いが容易な金属亜鉛微粉末、あるいは銅コーティング亜鉛（亜鉛触媒コア）をあらかじめハイドロゲル構造体、もしくはスピнкаラムの先端にフィルター状に埋め込み、サンプルを通液・接触させるだけで瞬時に亜硝酸へと還元され、直後のゲル層で即座（3分以内）にアゾ呈色が完結する「一体型全固体相硝酸イオン分析デバイス（流路一体型ゲルチップ）」の試作・設計に移行する。

本年度に見出された「未反応ゲルの空気露出による呈色現象」について、その詳細な反応メカニズム（空气中 NO_x の吸着速度論および水分量の影響）を熱力学的に解明する。条件を最適化した乾燥・半膨潤ゲルを本学周辺の Nakatsu River 水系周辺（森林域、道路沿い、居住区）の複数地点にパッシブサンプラーとして一定期間設置し、PiCOEXPLORER による吸光度読み取り値と、従来の大型分析装置による実測値をクロスバリデーション（相互相関評価）することで、超低コストな「面的大気汚染マッピング技術」としての新規シーズを開拓する。

6. 研究成果の発表

なし