

気流中の浮遊菌に対するコロナ放電の 除菌・電気集塵・殺菌効果の検討

岡田 龍*, 谷野 孝徳*, 古橋 拓也**, 斎木 あゆみ**, 大嶋 孝之*.¹

(2016年9月29日受付; 2016年11月25日受理)

Investigation of Elimination, Electrostatic Precipitation and Inactivation Effects by Corona Discharge Against Airborne Microorganism Under Airflow Condition

Ryu OKADA*, Takanori TANINO*, Takuya FURUHASHI**,

Ayumi SAIKI** and Takayuki OHSHIMA*.¹

(Received September 29, 2016; Accepted November 25, 2016)

The influences of electrode form, voltage waveform, and voltage frequency to generate corona discharge on elimination, electrostatic precipitation and inactivation effects against airborne microorganism were investigated under airflow condition. The electrodes that used in this study were wires with circle and rectangular cross-section. The electrode form affected the electrostatic precipitation effect than the elimination effect. As the applied voltage waveform, DC and rectangular wave with 50, 75 and 99% duty ratio were used for corona discharge generation. The electrostatic precipitation effect decreased with the decrease in duty ratio. In the condition using rectangular wave with 50% and 300 Hz, inactivation effect was almost active in the DC corona discharge treatment, but that in the rectangular wave corona discharge treatment was greatly inactivated.

1. はじめに

大気中を浮遊する微生物の除去・殺菌技術は食品製造施設や医療施設といった安全性・確実性の確保が必須となる施設において重要視されてきた。近年ではこれらの施設のみならず、住環境におけるアレルギーや感染症の予防の観点から民生用の空気清浄デバイスにおいても浮遊微生物の除去機能が注目されている。大気中に1 m³あたり1,000~10,000個程度存在する¹⁾とされる微生物を除去・殺菌するための技術²⁾としてフィルター捕集や電気集塵^{3,4)}が広く用いられ、フィルター上に捕捉された微生物の増殖・二次拡散の防止のために紫外線・薬剤殺菌技術との併用がなされている^{5,6)}。しかしながら民生用の空気清浄デバイスではメンテナンス、安全性の面からこれらの殺菌技術の導入は困難であり、新たな殺菌

技術として静電気技術である放電技術が注目^{7,8)}されストリーマ放電を導入した空気清浄デバイスが既に実用化されている⁹⁾。近年では情報技術を駆使することで住環境におけるエネルギーフローを管理・効率化し快適性を向上させつつ環境負荷の低減を実現するためHEMS (Home Energy Management System) といった技術の導入が図られており、電力供給のみで長期間稼働可能な放電による殺菌技術の空気清浄デバイスへの導入は今後一層重要性を増していくものと考えられる。

我々はエネルギー消費量が少なく比較的静音であるコロナ放電¹⁰⁾の空気清浄デバイスへの応用を目的として気中を浮遊する微生物に対する殺菌効果の検証を試みている。前報¹¹⁾にて閉空間の試験系を用いて気流を循環させながらコロナ放電の浮遊菌への影響を調査し、コロナ放電を発生させることで閉空間内から活性な浮遊菌を減少させること(除菌)が可能であることを報告した。本研究ではより実際の空気清浄デバイスに近い条件での検証を目的として、風洞を用いたワンパス試験系におけるコロナ放電の浮遊菌への影響を調査した。コロナ放電を発生させるための条件として、電極ワイヤー形状ならびに印加電圧形態が気流中の浮遊する活性な浮遊菌の除菌効果に及ぼす影響、ならびに除菌効果に占める殺菌効果と電気集塵効果の調査を実施した。

キーワード: コロナ放電, 殺菌, 電気集塵, プドウ球菌

* 群馬大学大学院理工学研究科環境創生理工学専攻

(〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

Department of Chemical and Environmental Engineering,
Graduated School of Engineering, Gunma University, 1-5-1,
Tenjin-cho, Kiryu city, Gunma, 376-8515, Japan

** 三菱電機株式会社住環境研究開発センター

(〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1)

Living Environment Systems Laboratory, Mitsubishi
Electric Corporation 5-1-1, Ofuna, Kamakura city,
Kanagawa, 247-8501, Japan

¹ tohshima@gunma-u.ac.jp

2. 実験方法・手順

2.1 電源

本研究ではコロナ放電を発生させるための電圧形態として直流電圧（図 1a）と矩形波電圧（図 1b）を用いた。図 1a, b には電流波形も追加しているが、直流と矩形波で電流の縦軸は異なっている。直流電圧は高圧電源（松定プレジジョン社製 HCOR-10B2）を用いて出力した。矩形波電圧はファンクションシンセサイザ（NF 回路設計ブロック株式会社製 FUNCTIONSYNTHESIZER1915）で波形を規定し高圧電源を用いて出力した。矩形波の周波数は 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, Duty 比は 50%, 75%, 99% に設定した。風洞内に設置したコロナ放電ユニットには太さの異なる様々な形状の電極を用いたため、実験は電流値を 1 k Ω の抵抗を介しデジタルマルチメーター（Advant社製 TR6864）を用いて測定・規定し実施した。電流値は直流電圧印加時には 60 μ A, 120 μ A, 180 μ A, 矩形波電圧印加時には 60 μ A に規定した。

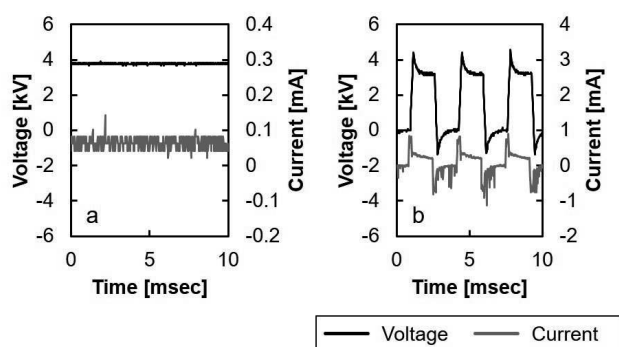


図 1 コロナ放電発生時の電圧・電流波形；
直流 60 μ A (a), 矩形波周波数 300 Hz, Duty 比 50% (b)
Fig.1 Voltage and current waveforms of corona discharge plasma ;
a DC 60 μ A
b Rectangular wave Frequency 300 Hz, Duty 50%

2.2 浮遊菌の調整

本研究ではコロナ放電による除菌対象として前報と同様¹¹⁾に表皮ブドウ球菌 *Staphylococcus epidermidis* (NBRC 100911) を用いた。本菌はブドウ球菌 *Staphylococcus* 属に属し多剤耐性菌・日和見感染菌として問題となる黄色ブドウ球菌とは近縁種でありながらヒトへの病原性の心配が無く拡散防止措置 P1 レベルの実験室で取り扱うことが可能である。表皮ブドウ球菌を表皮ブドウ球菌用液体培地（ペプトン 1% (w/v), 酵母エキス 0.2%, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.1%）にて 37 $^{\circ}\text{C}$ で 16 時間培養後、遠心分離し培地成分を除いた菌体を滅菌済み蒸留水に懸濁することで洗浄を行った。洗浄作業を 2 度行った後、再度遠心分離し菌体を 10⁸ CFU (Colony Forming unit)/ml と

なるように滅菌済み蒸留水に懸濁したものを試料として用いた。

2.3 浮遊菌殺菌試験に用いた実験装置ならびに殺菌操作

コロナ放電の電極形状は様々なものが提案されている¹²⁾が、本研究で用いたコロナ放電ユニットはタングステン製のリボン状（断面 400 $\times$ 50 μm , 300 $\times$ 50 μm , 300 $\times$ 80 μm の 3 種）またはワイヤー状（断面 100 $\mu\text{m}\phi$, 80 $\mu\text{m}\phi$ の 2 種）の高電圧電極を幅 10 mm のステンレス製アース電極に対し電極間距離 6.5 mm となるように配置している（図 2a）。リボン・ワイヤーの全長は 768 mm であり、192 mm 毎に折り返す（アース電極との対向部分は 167 mm）ことで縦に 4 層の積層構造とした（図 2b）。電極に対し垂直方向に浮遊菌を含む気体が通過し（図 2c）、この際リボン状電極の短辺側が気流に対し垂直になる。気体の流れを制御した状態でコロナ放電による気中浮遊菌のコロナ放電による除菌を実施するため、風洞内にコロナ放電デバイスを設置した（図 3）。風洞は 115 mm $\times$ 215 mm, 入り口からコロナ放電ユニットまでの距離 150 mm, コロナ放電ユニットから出口までの距離 200 mm, コロナ放電ユニット自体の厚さが 35 mm であり、全長 385 mm, 容量 9.52 L である。風洞出口にダイヤフラム型真空ポンプ（アルバック機工株式会社製 DA-60S）を流量計を介して接続し、流量を制御しながら吸引を行い風洞内に制御された気体の流れをつくりだした。気体流量は 70 L/min（風洞内滞留時間 8.2 秒, 電極通過所要時間 0.2 秒）となるように調整した。風洞入口にコンプレッサー式ネブライザー（オムロン株式会社製 NE-C28）を設置し菌懸濁液を噴霧することで風洞

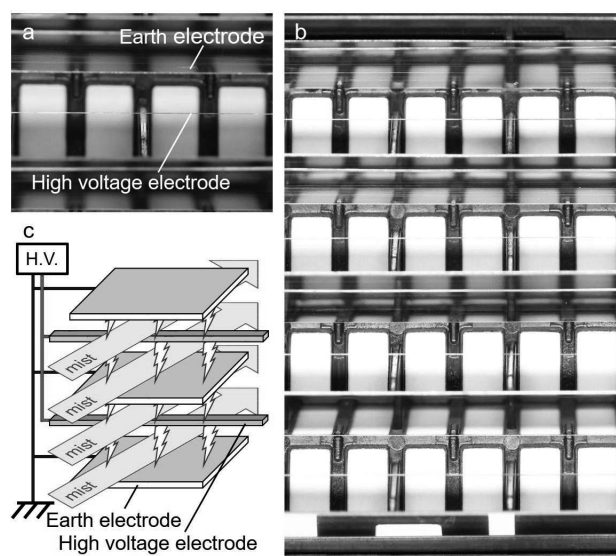


図 2 コロナ放電電極の詳細図
Fig.2 Detailed view of the corona discharge electrode

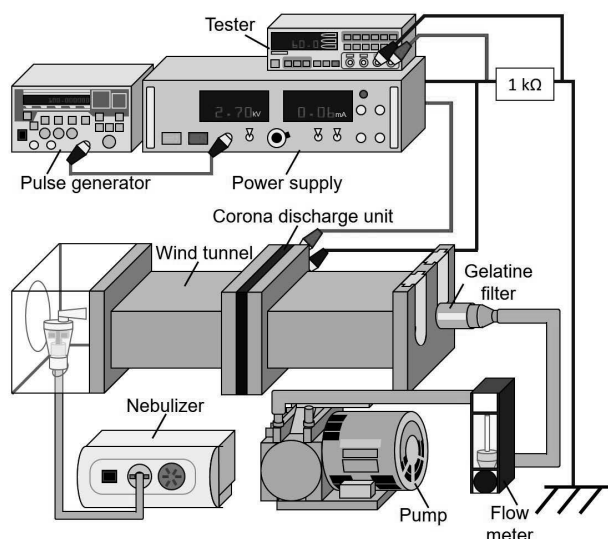


図3 実験装置の模式図

Fig.3 Schematic of experimental setup

内に浮遊菌を導入した。風洞出口にはゼラチンフィルター（Sartorius stedim biotech 社製 12602-80ALK）を設置し風洞内を通過した浮遊菌を捕集した。コロナ放電ユニット前後の通過粒子数を計測するためパーティクルカウンター（リオン株式会社 KC-52）に TYGON R-3603 チューブに接続し、チューブ先端をコロナ放電ユニット前後に設置した。

気流中の浮遊菌へのコロナ放電試験と回収は以下の手順で行った。風洞出口にゼラチンフィルターを設置した後、真空ポンプを稼働し気体流量を流量計を用いて調整した。電源を稼働しデジタルマルチメーターにより電流値を調整しコロナ放電を発生させ、8分間放置し電流値が安定していることを確認した。ネブライザーから5分間菌懸濁液を 0.4 mL/min にて噴霧し、ネブライザー、電源、真空ポンプの順に停止した後ゼラチンフィルターを風洞出口から回収した。回収したゼラチンフィルターを 40℃ に保温した滅菌蒸留水 10 mL に溶解し、ゼラチンフィルターに捕集された浮遊菌を滅菌水中に回収した。回収した菌液を 10 倍段階希釈し寒天培地に塗抹した後、37℃ で 16 時間培養後、コロニーを計測し生菌率を求めた。各試験はそれぞれ 3 回以上の独立した実験を実施し、それらの平均値を結果として示している。

本研究で除菌とは風洞内を通過する過程での活性な浮遊菌の除去・減少を示し、除菌効果は風洞内を通過する気流中の活性な微生物を除去・減少する効果、除菌率は活性な浮遊菌の除去・減少率、つまり生菌率の低下の割合（100 - 生菌率（%））を示す。コロナ放電による電気集塵効果の調査は菌懸濁液と同量の蒸留水を噴霧しパーティクルカウンターでコロナ放電ユニット前後の粒子数

を計測することで実施し、粒子数の減少の割合を電気集塵率（%）として求めた。この際、電圧を印加していない（電気集塵が起きない）条件での粒子減少量は差し引いて求めている。また本研究において殺菌効果とは風洞内を通過する過程で除去・減少した活性な浮遊菌（除菌）のうち、コロナ放電ユニットにより補足された浮遊菌（電気集塵）を除いたものであり、殺菌率（%）は除菌率（%）から電気集塵率（%）を差し引くことで求めた。また放電試験後に滅菌蒸留水 1.2 mL でアース電極表面を洗浄しアース電極上に捕集された浮遊菌を回収^{13,14)}し寒天培地で培養後コロニーを計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 電極形状がコロナ放電による気流中の浮遊菌の除菌に及ぼす影響

種々の形状の電極を用いたコロナ放電ユニットに図1で示した電流値が 60 μ A となる直流電圧を印加し、電極形状にかかわらず電極間にコロナ放電が発生することを確認した(図4)。コロナ放電ユニットを風洞内に設置し、表皮ブドウ球菌を用いて直流コロナ放電による気流中に噴霧した浮遊菌に対する影響を調査した(図5)。ゼラチンフィルターに捕捉された菌の生菌率の低下は除菌効果の向上を意味する。直流コロナ放電による除菌効果は用いた電極の形状に関わらずほぼ同様の傾向を示したが、電流値 60 μ A において断面 300 $\times$ 80 μ m のリボン状電極(図5c)ならびに断面径 80 μ m ϕ のワイヤー電極を用いた場合(図5e)に除菌効果は最も高く 85% となり、断面 400 $\times$ 50 μ m のリボン状電極を用いた場合(図5a)に除菌効果は最も低く 78% と電極形状による僅かな差が確認された。電流値を上昇させても除菌効果の大幅な向上は確認されず、いずれの電極においても除菌率は 90% 以上までは上昇しなかった。一方で直流コロナ放電の電気集塵効果は除菌効果に比べ用いた電極の形状によって差異が大きかった。粒子通過率の上昇は電気集塵効果の低下を意味する。特に電流値 60 μ A において断面

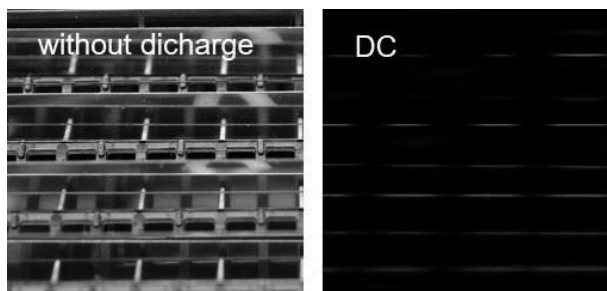


図4 コロナ放電の様子

Fig.4 Condition of the corona discharge

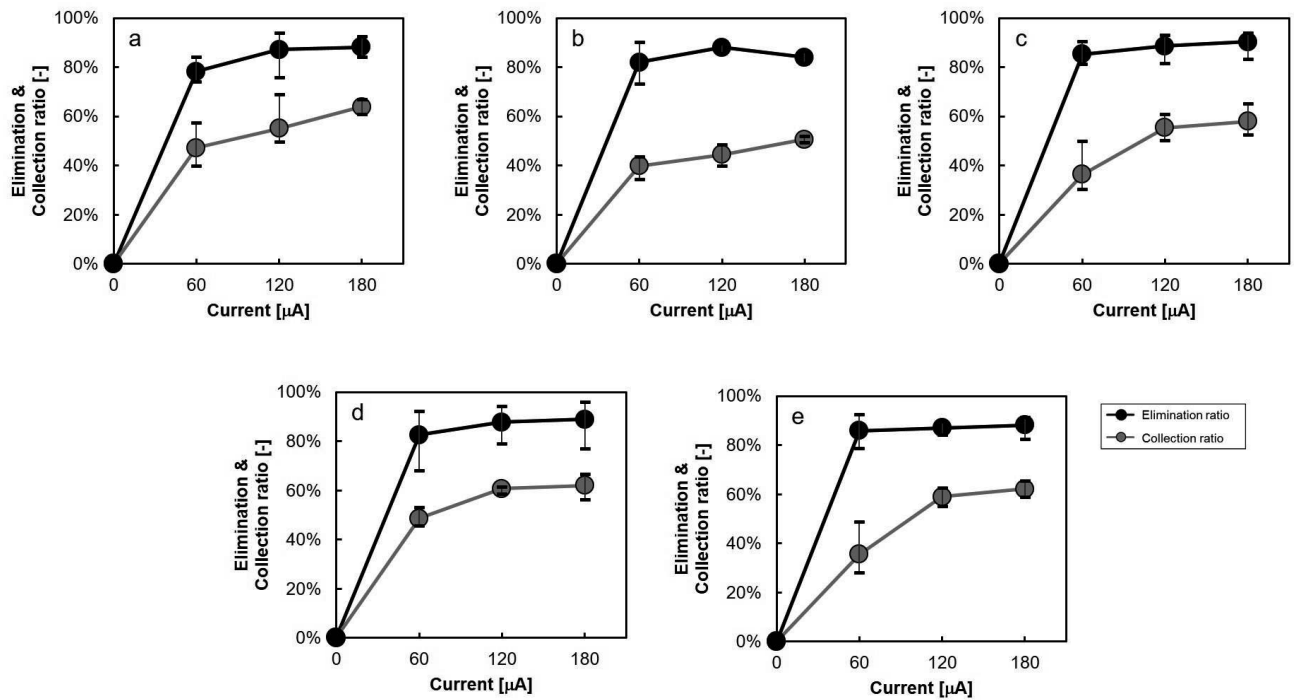


図5 電極形状が及ぼす除菌効果と電気集塵効果への影響

Fig.5 Elimination effect and electrostatic effect by electrode form;

- a Ribbon electrode 400 × 50 μm b Ribbon electrode 300 × 50 μm c Ribbon electrode 300 × 80 μm
 d Wire electrode 100 μmφ e Wire electrode 80 μmφ

400 × 50 μm のリボン状電極（図 5a），断面径 100 μmφ のワイヤー電極を用いた場合（図 5d）に電気集塵率はそれぞれ 47%，49%であったのに対し，断面 300 × 80 μm のリボン状電極（図 5c）ならびに断面径 80 μmφ のワイヤー電極を用いた場合（図 5e）に電気集塵率は 36%であった。また断面 300 × 50 μm のリボン状電極を用いた場合（図 5b）は電気集塵率 40%とこれらの中間の値となった。これらの結果からリボン状電極を用いた場合，気流に対し垂直方向の電極の幅は 80 μm 程度が最も電気集塵効果が小さくなり，電極と水平方向の電極の幅は小さいほうが電気集塵効果が小さくなることが示された（図 5a～c）。高電圧電極に均一な径を持つワイヤー電極を使用した場合，同心円状にコロナ放電が発生^{15,16)}するが，リボン状電極ではエッジからの放電が強くなると考えられる。このような放電形態が影響を与えていると考えられ，詳細はさらに検討が必要であるが，実用的には 300 × 80 μm の電極が最も有効であることが示された。

除菌効果と電気集塵効果の差がユニットを通過する浮遊菌に対する殺菌効果に相当するものと考えられ，断面 300 × 80 μm のリボン状電極（図 5c）ならびに断面 80 μmφ のワイヤー電極を用いた場合（図 5e）にこの差は最大となり，気流とともにコロナ放電ユニットを通過する浮遊菌は約 50%程度（図 5c, e）が殺菌されるものと考えられる。放電による殺菌技術を空気清浄デバイスに

導入するに際し，浮遊菌に対する高い殺菌効果が望まれるとともにメンテナンスの軽減，浮遊菌のデバイス内での増殖・二次拡散を防止するためコロナ放電ユニット部分での浮遊菌の蓄積は望ましくないと考えられるため電気集塵効果を抑えつつ除菌効果を最大にする，つまり高い殺菌効果を実現する必要がある。300 × 80 μm のリボン状電極の時の電気集塵率は 36%であり，100 μm のワイヤー電極の時の電気集塵率が 49%であり約 1.4 倍異なっている。つまり 300 × 80 μm のリボン状電極は 1.4 倍の期間使用できる可能性が示された。以下の実験は最も殺菌効果が高く電極断面積が大きいことから耐久性が高いと考えられるリボン電極（断面 300 × 80 μm）を用い，最も電力消費量が抑えられる電流値 60 μA にて実験を実施した。

3.2 電圧波形がコロナ放電による気流中の浮遊菌に及ぼす影響

種々の Duty 比・周波数において矩形波コロナ放電を用いた気流中の浮遊菌に対する除菌試験を実施した結果，矩形波コロナ放電を用いた場合の除菌効果ならびに電気集塵効果は Duty 比・周波数により大きく変化した（図 6）。Duty 比 99%での矩形波コロナ放電（図 6a）では直流コロナ放電とほぼ同等の結果が得られると予想されたが，粒子通過率の大幅な低下が確認され電気集塵効果が向上することが明らかとなった。これは矩形波コロ

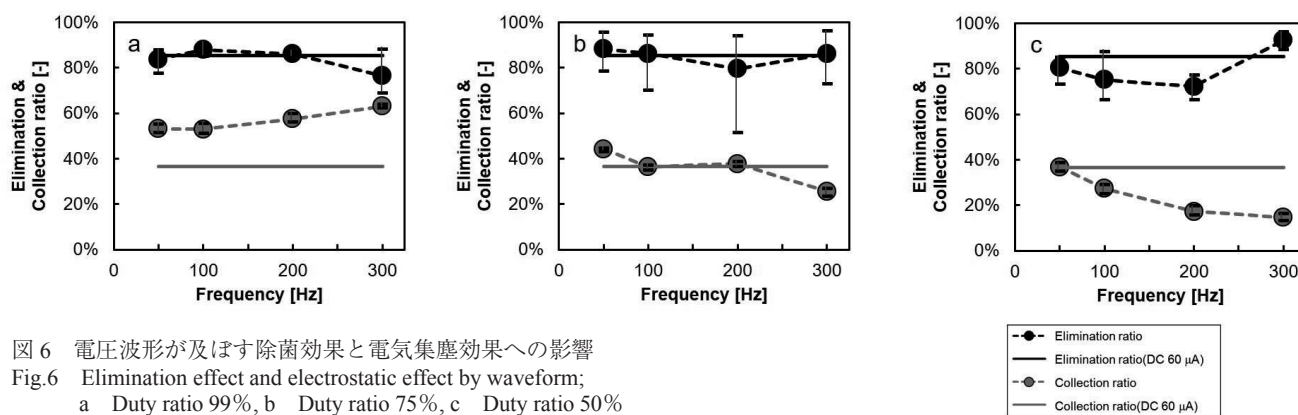


図6 電圧波形が及ぼす除菌効果と電気集塵効果への影響

Fig.6 Elimination effect and electrostatic effect by waveform;

a Duty ratio 99%, b Duty ratio 75%, c Duty ratio 50%

ナ放電では矩形波立ち上がり時の瞬間的な高電圧により直流コロナ放電に比べ荷電粒子が多く生成されるためではないかと考えられる。除菌効果は周波数 50~200 Hz では直流コロナ放電時と比較しほぼ同等であったが周波数 300 Hz では除菌率は 77%にとどまり、電気集塵効果が高まったことと合わせ殺菌効果は 13%と直流コロナ放電に比べ低い値となった。

Duty 比 75%での矩形波コロナ放電(図 6b)では電気集塵効果が抑えられ電気集塵率、除菌率共に直流コロナ放電に比べほぼ同等となり、唯一電気集塵率が直流コロナ放電に比べ低い周波数 300 Hz において殺菌率は 60%であった。Duty 比 75%では殺菌効果は直流コロナ放電と比べほぼ同等となることが確認された。

Duty 比 50%での矩形波コロナ放電(図 6c)においては電気集塵率が直流コロナ放電にくらべ高く周波数 300 Hz では 15%となることが確認された。これらの結果より電気集塵効果は Duty 比が小さくなると低下することが明らかとなった。これは Duty 比が小さいほどコロナ放電発生時間が短いため、粒子への荷電効果が弱まったためだと考えられる。周波数 300 Hz では除菌率が 93%と直流コロナ放電における除菌率と比べ上昇し、この時の殺菌率は 78%と高い値になった。

これらの結果より、電圧波形を制御することで除菌効果の向上、また除菌効果の内電気集塵効果を抑え電極への付着を低減しつつ殺菌効果の向上を図れることの可能性が示唆された。定常的にラジカルの発生やイオン風など種々の現象が発生する直流コロナ放電とは異なり、矩形波電圧により断続的なコロナ放電ではラジカルの再結合やイオン風の発生が変動するため、このような結果が得られたものと推察する。今回の実験条件では Duty 比 50%, 周波数 300 Hz が最も電気集塵効果が少なく殺菌効果が大きかったが、Duty 比・周波数と除菌・集塵効果との間に明瞭な関係性を見出すことができず、今後さらなる条件検討と活性種の発生・反応速度などを考慮したシ

ミュレーション等を含めたさらなる解析が必要であると考える。

3.3 電極上に捕集された菌への殺菌効果

コロナ放電の電気集塵効果によりアース電極上に捕集された浮遊菌の殺菌状態を調べた。アース電極上に捕集された粒子をすべて浮遊菌と仮定し、パーティクルカウンター測定値から浮遊菌捕集率を計算すると、直流電圧を印加した場合は図 5c より 36% (推定生菌数 9.0×10^6 CFU) であり、矩形波電圧を印加した場合は図 6c より 15% (推定生菌数 3.6×10^6 CFU) となる。また実際にアース電極上からラバーポリスマンを用い滅菌水中に回収し実測生菌数を求めたところ、直流電圧を用いた際には 7.7×10^6 CFU、矩形波電圧を印加した際には 1.4×10^5 CFU となった。パーティクルカウンターからの推定生菌数と回収した実測生菌数を比較した(図 7)。直流コロナ放電では電極に捕集された捕集粒子中の生菌率は 85%と捕集された浮遊菌の大半が活性な状態であることが明らかとなった。一方で矩形波コロナ放電では捕集粒子中の生菌率は 4%と直流コロナ放電に比べ大幅に低いものとなった。水中に懸濁した微生物の系では、細胞分裂の阻害^{17, 18)}や細胞膜の損傷^{19, 20)}など細胞膜に対する影響が研究されている²¹⁾。細胞膜に 1V 以上の電位差を与えると電界印加時から数 μ 秒の間で細胞膜に細孔が生じ細胞が壊死する²²⁾。矩形波電圧を用いた場合にはこのよ

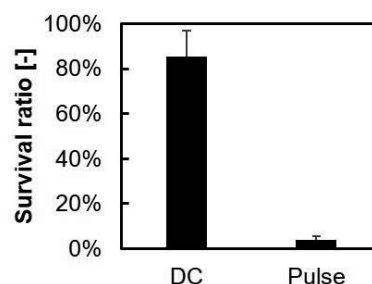


図7 電気集塵による捕集菌体中の生菌率

Fig.7 Survival ratio in collecting particles on earth electrode

うなパルス殺菌の効果が生じるのではないかと推測される。加えて、矩形波コロナ放電における印加間隔が短いと電極近傍の電気二重層が解消される前に次の放電が起こり細胞にかかる実質的な電圧が小さくなる²³⁾ことから、連続的な直流コロナ放電²⁴⁾に比べ断続的かつ印加間隔をとった矩形波コロナ放電²⁵⁾が殺菌効果が高くなった要因であると考えられる。

4. 結言

コロナ放電による気流中の浮遊菌への影響を調査を実施し、以下の結果を得た。

- (1) 直流コロナ放電、矩形波コロナ放電ともに気流中の浮遊菌の除菌が可能であった。
- (2) 電極形状により浮遊菌の除菌効果は僅かながら変化し、電気集塵効果は10%の差が確認された。
- (3) 矩形波コロナ放電では除菌効果と電気集塵効果は共にDuty比・周波数により変動し、Duty比を小さくすると電気集塵効果が低下することが明らかとなった。
- (4) 矩形波コロナ放電では電気集塵効果によりアース電極上に捕集された浮遊菌の多くが殺菌されることが示された。

参考文献

- 1) 石松維世, 安倍太喜, 福田和正, 石田尾徹, 谷口初美, 保利 一: 職場における浮遊微生物濃度の測定と細菌叢の解析. 産業衛生学雑誌, **49** (2007) 39
- 2) Sang-Gu Lee, Junho Hyun, Sung Hwa Lee, Jungho Hwang: One-pass antibacterial efficacy of bipolar air ions against aerosolized *Staphylococcus epidermidis* in a duct flow. Journal of Aerosol Science, **69** (2014) 71
- 3) Eric M. Kettleson, Bala Ramaswami, Christopher J. Hogan Jr., Myong-Hwa Lee, Gennadiy A. Statyukha, Pratim Biswas, Largus T. Angenent: Airborne Virus Capture and Inactivation by an Electrostatic Particle Collector. Environmental Science & Technology, **43** (2009) 15
- 4) G. Mainelis: Collection of Airborne Microorganisms by Electrostatic Precipitation. Aerosol Science and Technology, **30** (1999) 127
- 5) 奥田舜治, 嶋崎典子, 岡上 晃: 空中浮遊菌に関する除菌・殺菌装置の性能評価. 室内環境, **11** (2008) 21
- 6) 吉井 学: 放電式静電気除去装置による細菌の殺菌効果. 活水論文集, **57** (2014) 1
- 7) Jai Hyuk Choi, Inho Han, Hong Koo Baik, Mi Hee Lee, Dong-Wook Han, Jong-Chul Park, In-Seob Lee, Kie Moon Song, Yong Sik Lim: Analysis of sterilization effect by pulsed dielectric barrier discharge. Journal of Electrostatics, **64** (2006) 17
- 8) May Korachi, Zisan Turan, Kenan Senturk, Fikretin Sahin, Necdet Aslan: An investigation into the biocidal effect of high voltage AC/DC atmospheric corona discharges on bacteria, yeasts, fungi and algae. Journal of Electrostatics, **67** (2009) 678
- 9) 田中利夫, 茂木完治, 香川謙吉, 大久保利一: ストリーマ放電を利用した空気清浄装置の開発. 静電気学会誌, **29** (2005) 236
- 10) Igor V. Timoshkin, Michelle Maclean, Mark P. Wilson, Martin J. Given, Scott J. MacGregor, Tao Wang, John G. Anderson: Bactericidal Effect of Corona Discharges in Atmospheric Air. IEEE Transactions on Plasma Science, **40** (2012) 2322
- 11) 谷野孝徳, 宮崎 中, 古橋拓也, 大嶋孝之: コロナ放電による気中浮遊菌の除菌と接地電極板上の殺菌メカニズム. 静電気学会誌, **39** (2015) 2
- 12) 松浦良太郎, 桐山直樹, 藤井富朗, 北村 洋: 空気浄化用電気集塵装置の開発. 研究紀要, **43** (2005) 55
- 13) 曾川芳郎, 小林寛伊, 梶浦 工, 菅原えりさ, 竹内千恵, 遠藤博久: ラバーポリスマンを用いたカップスクラブ法による皮膚細菌の採取法の有用性. 医療関連感染, **3** (2010) 61
- 14) ASTM International. E 1874. Test Method for Evaluation of Antibacterial Washes by Cup Scrub Technique. 2006
- 15) Junhong Chen, Jane H. Davidson: Electron Density and Energy Distributions in the Positive DC Corona: Interpretation for Corona-Enhanced Chemical Reactions. Plasma Chemistry and Plasma Processing, **22** (2002) 199
- 16) 伊藤圭昌, 今井裕介, 村田明彦, 吉沢正紹: 線対平板電極系に形成されるコロナ放電場に張られた弦の横振動. Dynamics & Design Conference, **347** (2003) 1
- 17) 岡洋 佑, 村本裕二, 清水教之, 市原茂幸: 電子情報通信学会技術研究報告, **109** (2013) 27
- 18) 岡洋 佑, 村本裕二, 清水教之, 加藤雅士: 電子情報通信学会技術研究報告, **110** (2013) 33
- 19) Wanda Krassowska, Petar D. Filev: BModeling Electroporation in a Single Cell. iophysical Journal, **92** (2007) 404
- 20) C. Jiang, et al.: A Review of Basic to Clinical Studies of Irreversible Electroporation Therapy. IEEE Trans Biomed Eng, **62** (2014) 4
- 21) Andrei G. Pakhomov, Rachael Shevin, Jody A. White, Juergen F. Kolb, Olga N. Pakhomova, Ravindra P. Joshi, Karl H. Schoenbach: Membrane permeabilization and cell damage by ultrashort electric field shocks. Archives of Biochemistry and Biophysics, **465** (2007) 109
- 22) 薄 良彦: 電子情報通信学会技術研究報告, **113** (2013) 81
- 23) 岡田 伸, 中村小春, 吉松秀隼, 吉田将大, 福永鷹信, 藏田耕作, 高松 洋: バイオフロンティア講演会講演論文集, **26** (2015) 41
- 24) 野副 悟, 太田正廣, 吉田 真: バイオエンジニアリング学術講演会・セミナー講演論文集, **13** (2002) 101
- 25) Shesgakamal Jayaram, G. S. P. Castle: Kinetics of Sterilization of *Lactobacillus brevis* Cells by the Application of High Voltage Pulses. Biotechnology and Bioengineering, **40** (1992) 1412