論文　帯電したモルタルの花粉吸着性能の研究

中垣　琴葉*1・伊藤　洋介*2・河辺　伸二*3

要旨：大きな社会問題の 1 つである花粉症に対し，著者らは表面仕上げ材料として用いられるモルタルに花粉の吸着性能を付与することで大気中に浮遊する花粉を減じ，問題の解決を試みる。本研究では，モルタルに電圧を印加し，帯電させることでモルタルに花粉吸着性能を付与できることを確認した。本研究の測定範囲内では，出力電圧とモルタルの表面電位は比例関係であり，表面電位が 0.7～3.5kV，-0.8～-3.9kV では帯電開始から 10 秒間は表面電位の絶対値が大きいほど吸着量が大きくなる。また，表面電位の絶対値が 3.1kV 以上では帯電時間 30 秒以内で吸着量が減少し始めることを確認した。

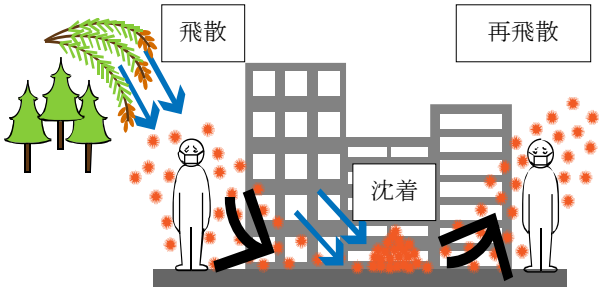
キーワード：花粉，モルタル，静電気，出力電圧，表面電位，吸着量

1. はじめに

スギやヒノキ等の花粉，黄砂，PM2.5等，大気中を浮遊する粉体には人体にアレルギー等の不具合を引き起こすものがある。鼻アレルギーの全国疫学調査[1]によれば，2008年のスギ花粉症の有病率の全国平均は26.5%で1998年の16.2%を10%以上も上回っており，4人に1人がスギ花粉症である。また，スギ花粉症患者の増加に伴いスギ花粉症への対応には多額の医療費が投じられている。医療費と通院費や待ち時間等の医療関連費を含む直接費と，休業や休職による生産のロスの間接費の合計から推計される1年間に要するスギ花粉症の費用は2860億円[2]であり，花粉症による経済的な損失は大きい。すなわち，花粉症対策は急務である。

花粉は**図－1**に示す通り，発生源から飛散し，直接人体に影響する場合と，路面や建築物の壁面等に沈着し，自然風や自動車の走行等により発生する風で再飛散し，人体に影響する場合がある。このような花粉の挙動に関する研究[3]や，都市における花粉の再飛散に関する研究[4]等が行われているが，具体的な解決策を提案するものは多くない。花粉が人体に及ぼす影響を軽減するためには大気中の花粉量を減らす必要がある。表面仕上げ材として用いられる建築材料で花粉の再飛散を防止し，大気中の花粉を減じられれば，具体的な解決策になり得る。

そこで，著者ら[5]は，表面仕上げ材料として大量使用に耐え得る安価なモルタルに花粉の再飛散防止性能を付与して問題解決を図ってきた。表面形状の異なるモルタルに疑似花粉を堆積させ，風洞装置を用いて再飛散させることで，流速6m/s以上では表面が平滑な型枠面よりも，粗面である木ごて仕上げを施した方が再飛散を抑制できることを示した。また，モルタル表面に仕上げとしてスリットを設けた場合，流速6m/s以上では風向きに対し直交する方向にスリットを設けた方が再飛散を抑制できることを示した。



図－1　都市部での花粉の飛散状況

しかし，花粉の多くは建築物等に堆積した状態ではなく大気中に浮遊した状態であり，大気中の花粉量を減らすためには再飛散を抑制するだけでなく，大気中の花粉を吸着する必要がある。工事現場等では，粉塵等が浮遊し汚染された空気から集塵装置で粉塵等を吸着し，取り除く方法が用いられる。集塵装置はフィルターにより粉塵等を取り除く場合や，静電気を用いて粉塵等を吸着させる場合[6]がある。本研究は静電気による集塵作用に着目し，帯電したモルタル表面付近の疑似花粉が電気的に分極してモルタル表面に付着することを吸着と定義して,モルタルを帯電させることで花粉の吸着を試みる。

コンクリートやモルタル表面の美観を保つために，静電気の帯電を防止し，汚れをつきにくくする研究[7]が行われてきたが，静電気による吸着性能をコンクリート及びモルタルに付与し，有効利用する研究は少なく，基礎となる知見も多くない。そこで，本研究ではモルタルに電圧を印加して帯電させた場合の出力電圧とモルタルの表面電位の関係及び帯電したモルタルの花粉吸着性能を明らかにすることで花粉吸着性能を持つ材料開発のための基礎資料を得ることを目的とする。

*1 名古屋工業大学大学院　社会工学専攻　（学生会員）
*2 名古屋工業大学大学院　准教授　博（工）　（正会員）
*3 名古屋工業大学大学院　教授　工博　（正会員）

2. 実験材料

2.1 供試体

表－1 に示す調合のモルタルで供試体を作製した。供試体の寸法は長さ 200×幅 200×高さ 30mm の平板である。セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3），細骨材は愛知県豊田市産の山砂（最大寸法 5mm，表乾密度 2.55g/cm^3）を使用した。

モルタルを型枠に打設後 24 時間は室温 20±5℃，相対湿度 56～83%の室内で気中養生した。気中養生後に室温 20±5℃の室内の水に浸漬して，7 日間水中養生を行った。水中養生終了後は気中養生時と同様に 20±5℃，相対湿度 56～83%の室内で保管した。

2.2 疑似花粉

花粉は一般的に花粉飛散の研究に使用される [4]ヒカゲノカズラ胞子を疑似花粉として用いた。疑似花粉は平均粒径約 35μm，真密度 1.05g/cm^3 で，空気動力学径がスギ花粉とほぼ等しいが，アレルギーの原因になりにくい。

3. 実験装置

モルタルを帯電させるために，直流高圧電源（KTK-125P，KTK-125N（株）春日電機製）を用いた。直流高圧電源の仕様を**表－2** に示す。この装置は出力電圧を 0～±20.0kV まで 0.1kV 毎に調節することが可能であり，機器誤差は±5%以内である。

モルタルの表面電位の測定には，デジタル静電電位測定器（KSD-0103（株）春日電機製）を用いた。デジタル静電電位測定器は物体の静電現象を非接触表面電位センサで検出する。測定電位範囲は±0.1～±50kV である。

4. 実験方法

4.1 モルタルの表面電位の測定

モルタルの表面電位の測定の実験装置を**図－2** に示す。供試体は絶縁体（天然ゴム）上に設置し，供試体は 200×200mm の裏面の中央から銅線で直流高圧電源と接続した。**図－2** に示す通り，電位測定器は供試体の 200×200mm の表面から 100mm 離して固定した。

出力電圧は-12.0～12.0kV（0kV を除く）の範囲で 2.0kV ずつ変化させ，供試体中央の表面電位を測定した。出力電圧±2.0，±6.0，±12.0kV では，**図－2** に示す 50mm 間隔の 9 箇所の観測点で表面電位を測定した。水平方向を x 軸，鉛直方向を y 軸として観測点の位置(mm)を座標で表す。供試体の左下隅を原点とし，供試体中央の観測点を(x,y)＝(100,100)とする。

各出力電圧で帯電開始から 30 秒間は 10 秒毎，それ以降は 30 秒毎に表面電位を記録し，180 秒間表面電位の測定を行い，180 秒間の平均値を平均表面電位とした。

4.2 帯電したモルタルの疑似花粉吸着性能の測定

疑似花粉吸着性能の測定の実験装置を**図－3** に示す。供試体は絶縁体（天然ゴム）上に設置し，銅線で供試体裏面の中央と直流高圧電源と接続した。4.1 節より，供試体の表面で表面電位の絶対値が最大となる点を測定点とした。測定点がある面に対して垂直方向に 10mm 離し，測定点の高さより 10mm 下方に，長さ 2×幅 2×高さ 0.5mm に成形した疑似花粉を設置し，モルタル表面から約 10～15mm の範囲に存在する疑似花粉の吸着を測定した。測定点に焦点が合う位置にマイクロスコープ（L-835, L-817（株）ホーザン製）を設置した。

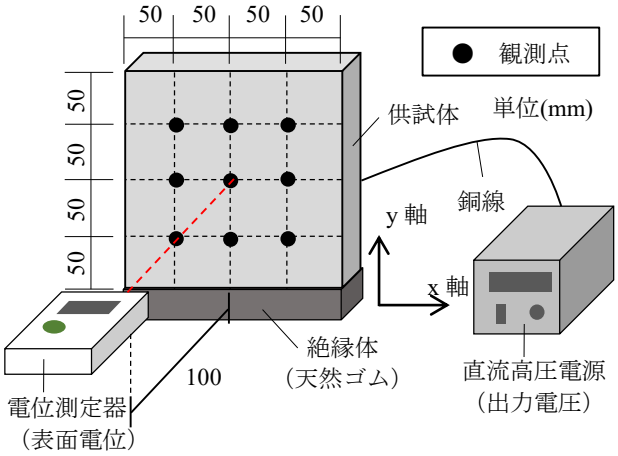
出力電圧は-12.0～12.0kV（0kV を除く）の範囲で 2.0kV

表－1　モルタルの調合（質量比）

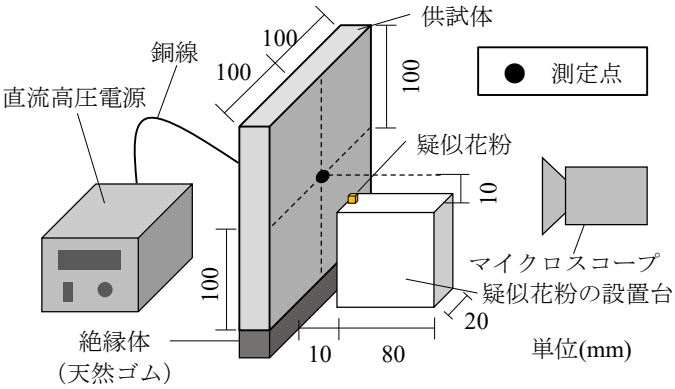
セメント	水	細骨材	W/C (%)
2	1	6	50

表－2　直流高圧電源の仕様

出力電圧 (kV)	0～±20.0
出力電流 (mA)	0.5(max)
消費電力 (VA)	20 以下



図－2　モルタルの表面電位の測定の実験装置



図－3　疑似花粉吸着性能の測定の実験装置

ずつ変化させ，各出力電圧で帯電開始と同時にマイクロスコープの視野面積(約 2.4×1.8mm)内の疑似花粉の動きを動画で撮影した。帯電開始から 10 秒間は 2 秒毎，帯電開始 10 秒から 30 秒の間は 10 秒毎，それ以降は 30 秒毎に，静止画を抽出し，マイクロスコープの視野面積内のモルタル表面に吸着された疑似花粉を目視で判別し，計数した。帯電時間及び動画の撮影時間は 180 秒間とし，各出力電圧毎に 3 回測定を行った。

5. 実験結果と考察

5.1 表面電位と出力電圧の関係

供試体中央の観測点の表面電位の絶対値と出力電圧の絶対値の関係を**図－4** に示す。正帯電，負帯電ともに表面電位の絶対値と出力電圧の絶対値は比例関係である。表面電位の絶対値を a[kV]，出力電圧の絶対値を b[kV]とすると，原点を通る近似直線は正帯電の場合は式(1)に，負帯電の場合は式(2)に示される。

$$a=0.35b \quad (1)$$

$$a=0.39b \quad (2)$$

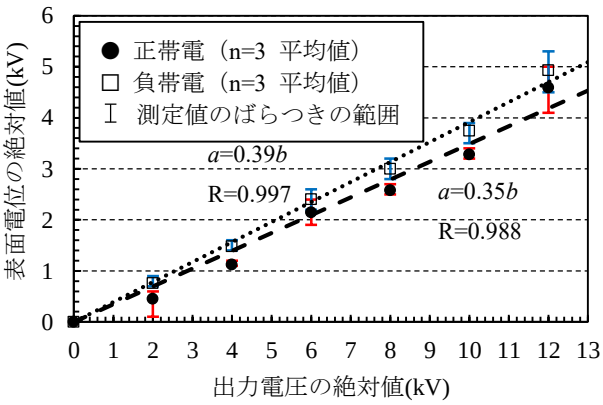
正帯電と負帯電の場合の表面電位の絶対値を比較すると，出力電圧によらず負帯電の表面電位の絶対値の方が大きいため，モルタルは負に帯電しやすいと考える。

5.2 表面電位の分布

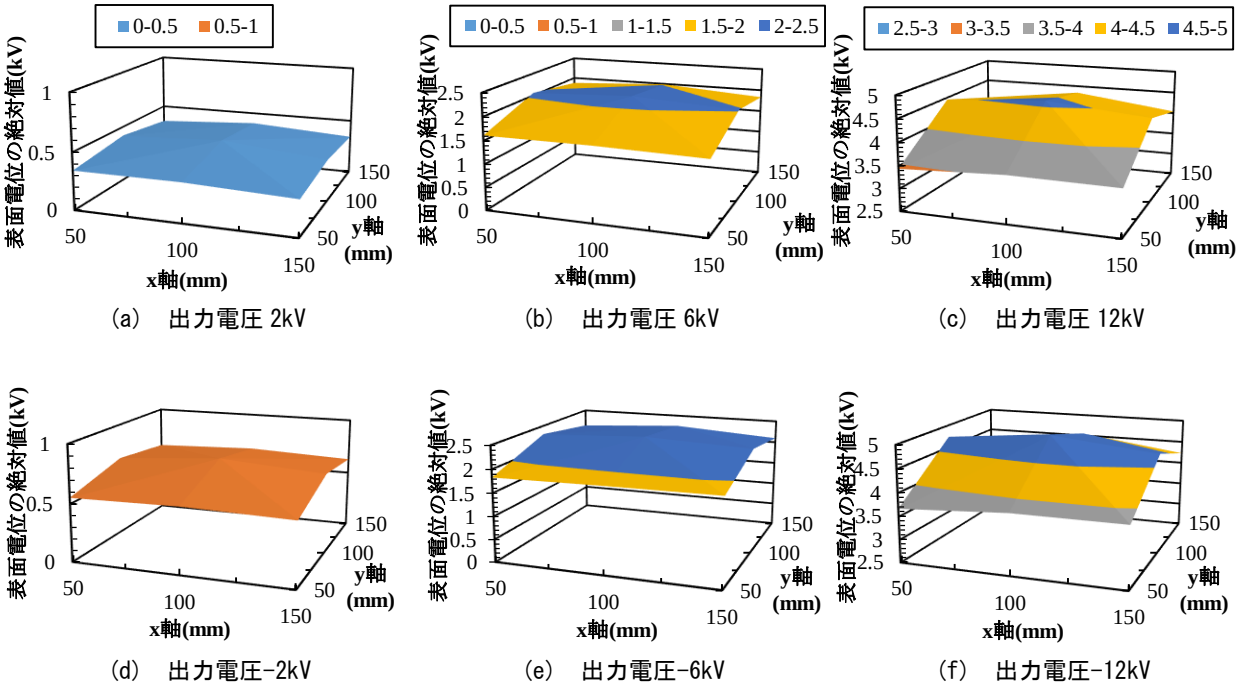
表面電位の絶対値の分布を出力電圧毎に**図－5** に示す。全ての出力電圧で供試体中央の観測点(100,100)の表面電位の絶対値が最大となる。**図－5**(a)，(d)より出力電圧±2.0kV の場合，正帯電と負帯電ともに表面電位の絶対値は位置による変化が 0.5kV 以内に収まっており，モルタル表面はほぼ均一に帯電していると考える。

図－5 (b)，(e)より出力電圧±6.0kV の場合，正帯電と負帯電ともに表面電位の絶対値は位置による変化が 1.0kV 以内であるが，出力電圧±2.0kV の場合に比べるとその変化は大きい。x が等しい場合，y=100 より，y=50，y=150 で表面電位の絶対値が小さく，y が等しい場合は x=100 より，x=50，x=150 で表面電位の絶対値が小さい。これは供試体端部から周辺環境に放電するためと考える。y=50 で表面電位の絶対値が最も小さくなるのは，供試体端部と地表面の距離が短く，他の供試体端部に比べ放電しやすいためと考える。

図－5 (c)，(f)より出力電圧±12.0kV の場合，正帯電と負帯電ともに表面電位の絶対値は位置による変化が 1.5kV 以内である。出力電圧±6.0kV の場合と同様に，x が



図－4　表面電位の絶対値と出力電圧の絶対値の関係



(a)　出力電圧 2kV　(b)　出力電圧 6kV　(c)　出力電圧 12kV

(d)　出力電圧-2kV　(e)　出力電圧-6kV　(f)　出力電圧-12kV

図－5　表面電位の絶対値の分布

等しい場合，y=100 より，y=50，y=150 で表面電位の絶対値が小さく，y が等しい場合は x=100 より，x=50, x=150 で表面電位の絶対値が小さい。x 軸方向に比べて y 軸方向の表面電位の変化が大きいのは供試体端部の条件が異なるためと考える。出力電圧±12.0kV の場合では，出力電圧±6.0kV の場合に比べ，観測点の位置による表面電位の変化が大きい。これは印加する電圧が高くなるにつれて放電しやすくなるためと考える。

5.3 帯電時間と表面電位による吸着量の変化

視野面積内の疑似花粉の個数を視野面積で除し，1mm^2 あたりの疑似花粉の個数を吸着量とする。式(1)，式(2)を用いて出力電圧から算出した表面電位を**表－3** に示す。表面電位毎の吸着量と帯電時間の関係を**図－6**，**図－7** に，帯電時間 10 秒と 180 秒における吸着量と表面電位の絶対値の関係を**図－8** に，吸着量が最大になる帯電時間と表面電位の絶対値の関係を**図－9** に示す。

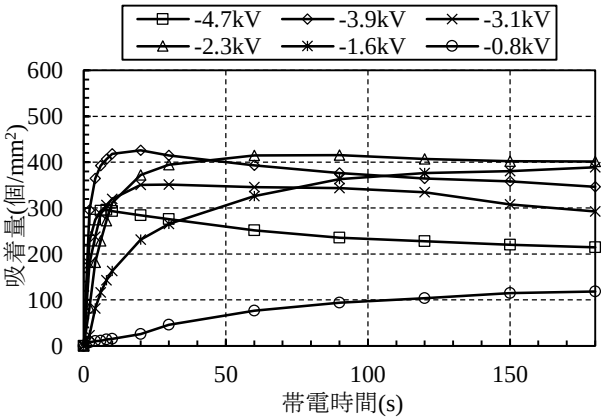
図－6, **図－7** より，表面電位が 0.7～3.5kV, -0.8～-3.9kV では，帯電開始から 10 秒間は吸着量は常に増加し，表面電位の絶対値が大きいほど吸着量が大きくなる。表面電位 4.2kV の吸着量は 3.5kV の吸着量に比べて，表面電位 -4.7kV の吸着量は-3.9kV の吸着量に比べて小さくなる。これは表面電位 4.2kV，-4.7 kV では，表面電位の絶対値が大きいことでモルタル表面付近の疑似花粉がモルタル表面と同極性に帯電し，反発するためと考える。また，疑似花粉はモルタル表面に付着することで電荷の移動が生じ帯電すると考える。疑似花粉の反発は目視で確認できる。表面電位-4.7kV では帯電時間 8 秒から 10 秒で吸着量が減少し始める。これはモルタルが負に帯電しやすく表面電位の絶対値が最も大きく，モルタル表面付近の疑似花粉がより早くモルタル表面と同極性に帯電し，反発するためと考える。

帯電時間 10 秒以降の吸着量の変化は，表面電位 0.7kV，1.4kV，-0.8kV，-1.6kV では 180 秒間吸着量が増加する。表面電位 3.5kV，4.2kV は 20 秒まで，表面電位-3.1kV，-3.9kV，-4.7kV ではそれぞれ 30 秒，20 秒，10 秒まで吸着量は増加し，以降吸着量は減少する。表面電位 2.8kV では 60 秒までは吸着量は増加し，以降吸着量は減少するが，表面電位 3.5kV，4.2kV の場合の減少に比べ変化が小さい。表面電位-2.3kV でも，60 秒までは吸着量が増加し，60 秒以降の吸着量はほとんど変化しない。吸着量が減少するのは，吸着した疑似花粉の一部がモルタルと同極性に帯電し，反発するためと考える。

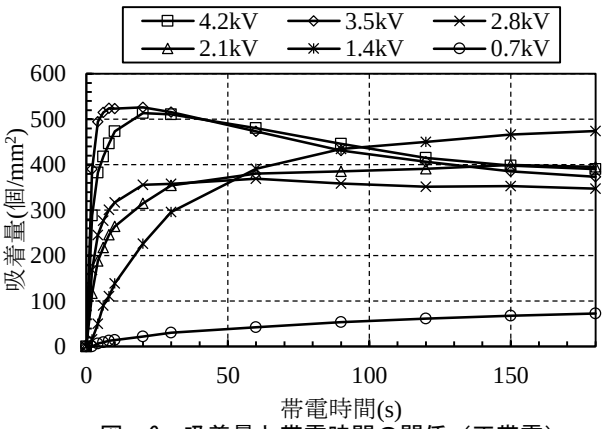
図－8 より帯電時間 10 秒では表面電位の絶対値が正帯電で 3.5kV，負帯電で 3.9kV のとき吸着量が最大である。表面電位の絶対値が 2.8kV 以下では正帯電と負帯電の吸着量と表面電位の絶対値の関係にほとんど差がない。表面電位の絶対値が 2.8kV より大きくなると正帯電の吸着量の方が大きくなる。これは疑似花粉が負帯電よりも正帯電したものに引き寄せられやすいためと考える。帯電時間 180 秒でも同様に正帯電の吸着量が大きくなる場合がある。また，吸着量が最大になる表面電位の絶対値は正帯電で 1.4kV, 負帯電で 2.3kV のときであり，

表－3　出力電圧から算出した表面電位の絶対値

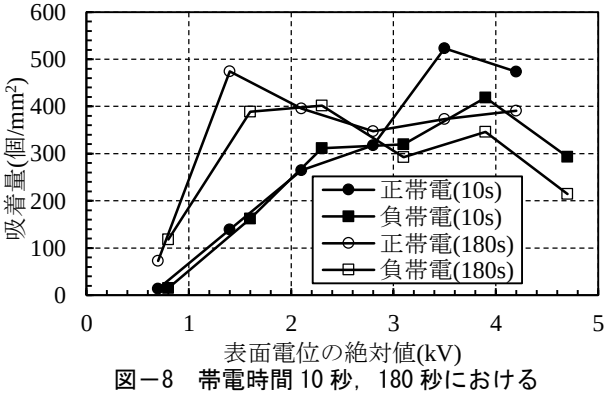
出力電圧の絶対値(kV)	2	4	6	8	10	12
正帯電(kV)	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	4.2
負帯電(kV)	0.8	1.6	2.3	3.1	3.9	4.7



図－7　吸着量と帯電時間の関係（負帯電）



図－6　吸着量と帯電時間の関係（正帯電）



図－8　帯電時間 10 秒，180 秒における吸着量と表面電位の絶対値の関係

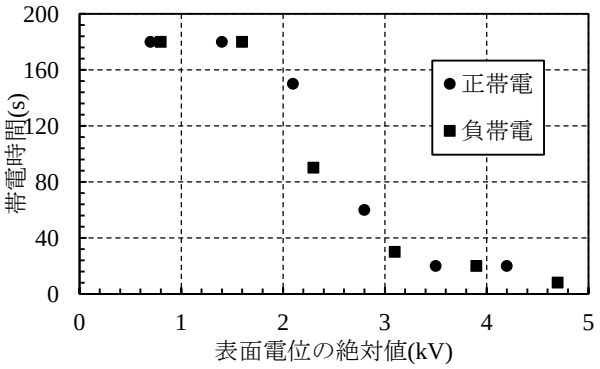
帯電時間 10 秒の場合と比較すると小さくなっている。すなわち，表面電位の絶対値が小さくても帯電時間を長くすれば吸着量を大きくすることができる。

図－9 より正帯電，負帯電ともに表面電位の絶対値が大きくなるほど吸着量が最大になる帯電時間が短くなる。表面電位の絶対値が 0.7～1.6kV では吸着量が最大となる帯電時間は 180 秒となっているが，測定時間を延長すれば，180 秒以降となる可能性がある。表面電位の絶対値が 3.1kV 以上だと帯電時間 30 秒以内で吸着量が減少し始めるため，断続的に帯電するのがよいと考える。

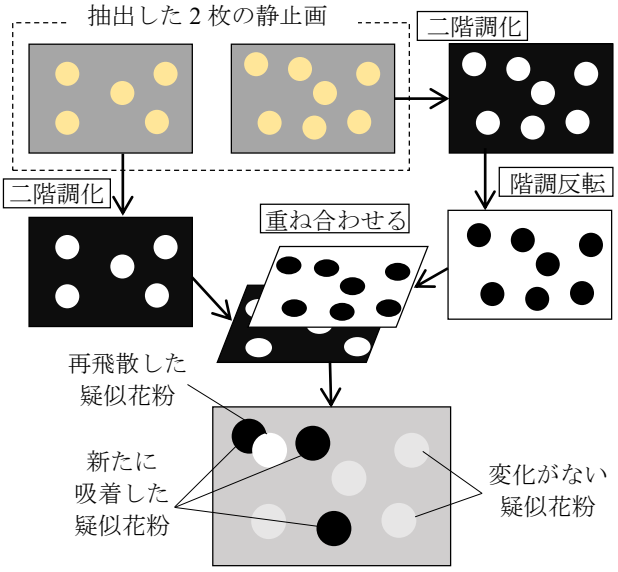
5.4 帯電時間と表面電位による増加量と減少量の変化

各帯電時間においては新たな疑似花粉が吸着するだけでなく，再飛散が同時に生じている。そこで，静止画の抽出間隔において 1mm^2 あたりに新たに吸着した疑似花粉の個数を増加量，再飛散した疑似花粉の個数を減少量とし，**図－10** に示す方法で増加量と減少量を求める。撮影した動画より抽出された 2 枚の静止画を二階調化し，疑似花粉が白色，背景が黒色の画像とする。帯電時間の遅い画像の階調を反転し帯電時間の早い画像と重ね合わせる。重ね合わせた画像の黒色の箇所は新たに吸着した疑似花粉を，白色の箇所は再飛散した疑似花粉を，灰色の箇所は吸着状態に変化がないことを示す。静止画の抽出間隔毎に黒色の疑似花粉と白色の疑似花粉をそれぞれ計数し，視野面積で除して増加量，減少量とする。表面電位毎の単位時間あたりの増加量と帯電時間の関係を**図－11**，**図－12** に，表面電位毎の単位時間あたりの減少量と帯電時間の関係を**図－13**，**図－14** に，帯電時間 30 秒における増加量，減少量と表面電位の絶対値の関係を**図－15** に示す。

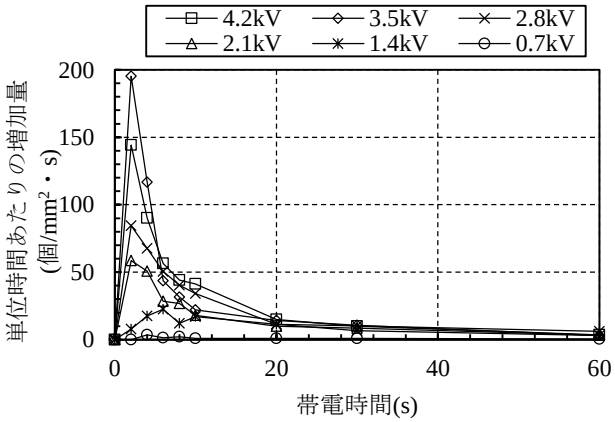
図－11，**図－12** より正帯電と負帯電ともに帯電時間 2 秒では単位時間あたりの増加量が最大で， 2 秒以降は単位時間あたりの増加量が減少する。帯電時間 20 秒以降は表面電位によらず単位時間あたりの増加量はほとんど差がない。同様に**図－13**，**図－14** より正帯電と負帯電ともに帯電時間 4 秒での単位時間あたりの減少量が最大で， 4 秒以降は単位時間あたりの減少量が減少し，帯電時間 20 秒以降は表面電位によらず単位時間あたりの減少量はほとんど差がない。減少量と比較して増加量の方が多いことから，帯電により花粉が吸着できることが分かる。帯電初期は疑似花粉の吸着や再飛散にエネルギー



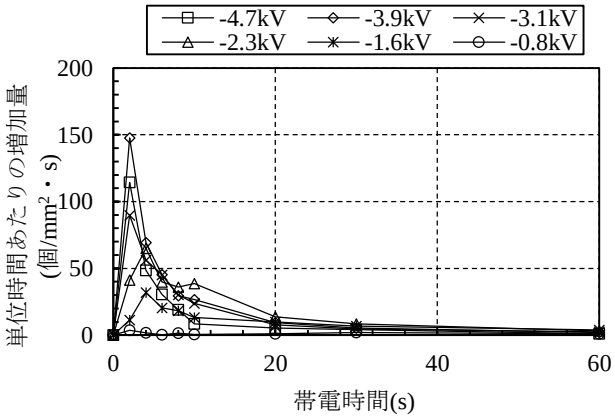
図－9　吸着量が最大になる帯電時間と表面電位の絶対値の関係



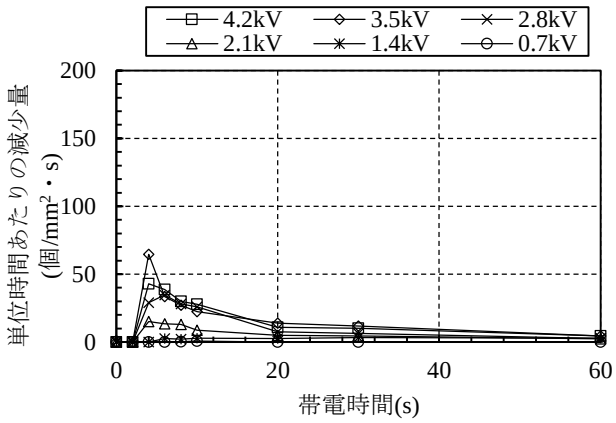
図－10　増加量と減少量の算出過程



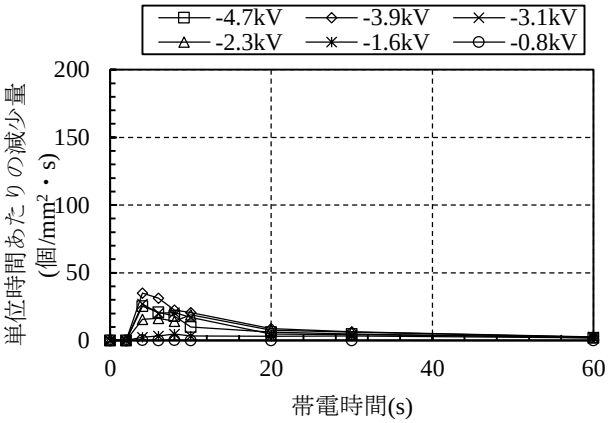
図－11　単位時間あたりの増加量と帯電時間の関係（正帯電）



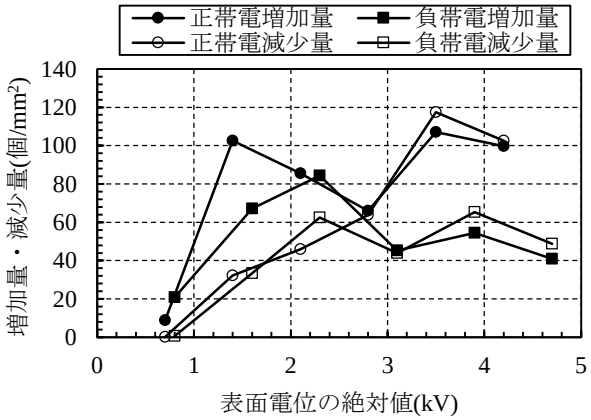
図－12　単位時間あたりの増加量と帯電時間の関係（負帯電）



図－13　単位時間あたりの減少量と帯電時間の関係（正帯電）



図－14　単位時間あたりの減少量と帯電時間の関係（負帯電）



図－15　帯電時間 30 秒における増加量・減少量と表面電位の絶対値の関係

が消費されるが，吸着した疑似花粉が多くなると疑似花粉をモルタル表面に吸着させた状態を保つことにエネルギーを要するため吸着や再飛散が発生しにくくなり，増加量，減少量ともに減少すると考える。

図－15 より帯電時間 30 秒では表面電位の絶対値が 3.1kV より大きくなると正帯電，負帯電ともに増加量より減少量の方が大きくなる。このため，帯電は 30 秒以内で断続的に行った方がよいと考える。

6. まとめ

本研究の測定範囲内において，以下のことが分かった。

1) 正帯電と負帯電ともにモルタルの表面電位の絶体値と出力電圧の絶対値は比例関係である。
2) 出力電圧±2.0kV の場合，正帯電と負帯電ともに表面電位の絶対値は位置による変化が 0.5kV 以内に収まっていることからほぼ均一に帯電している。出力電圧±12.0kV では，出力電圧±6.0kV の場合に比べ，観測点の位置による表面電位の変化が大きい。
3) 表面電位が 0.7～3.5kV，-0.8～-3.9kV では，帯電開始から 10 秒間は吸着量は常に増加し，表面電位の絶対値が大きいほど吸着量が大きくなる。表面電位 4.2kV の吸着量は 3.5kV の吸着量に比べて，表面電位-4.7kV の吸着量は-3.9kV の吸着量に比べて小さくなる。表面電位-4.7kV では，帯電時間 8 秒から 10 秒で吸着量が減少し始める。
4) 帯電時間 30 秒では表面電位の絶対値が 3.1kV より大きくなると正帯電，負帯電ともに疑似花粉の増加量より減少量の方が大きくなる。このため，帯電は 30 秒以内で断続的に行った方がよいと考える。

謝辞

装置に関して春日電機株式会社の協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

1) 馬場廣太郎：鼻アレルギーの全国疫学調査 2008（1998 年との比較）耳鼻咽喉科医およびその家族を対象として，Progress in medicine, Vol.28, No.8, pp.2001-2012, 2008
2) 川口毅，星山佳治，渡辺由美：スギ花粉症の費用について，アレルギーの臨床，Vol.21，pp.178-182，2001
3) 中根一朗：スギ花粉の浮遊飛散挙動と落下後の跳躍挙動に関して，日本機械学会論文集（B 編），Vol.78, No.790, pp.1220-1234, 2016
4) 佐橋紀男：都市部における花粉の再飛散，スギ花粉症克服に向けた総合研究成果報告書，No.1，pp.361-378, 2000.8
5) 中垣琴葉，伊藤洋介，河辺伸二:モルタルの表面形状が花粉の再飛散に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1347-1348, 2019.8
6) 三沢清扶，高橋昭教：静電気を利用した新集じん法，安全工学，Vol.10，No.5，pp.279-284，1971
7) 仕入豊和，池濃茂雄：コンクリート表面の汚れとその対策，コンクリート工学，Vol.24，No.7，pp.52-58，1986.7