

PM2.5対応エアコンのプラズマ電気集塵解析

Plasma Analysis Technologies for PM2.5 Electric Particle Collectors to Improve Performance of Room Air Conditioners

宇井 明生 佐藤 陽介 関 勇輔

■ UI Akio

■ SATO Yosuke

■ SEKI Yusuke

近年、大気中のPM2.5（粒径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の粒子状物質）は人体、特に呼吸器系への悪影響が懸念されている。

室内の空気清浄化技術及び集塵（しゅうじん）技術が重要となるなか、東芝は国内で唯一^(注1)、PM2.5集塵性能基準HD-128^(注2)に適合したエアコンを製品化している。製品化にあたりエアコンの集塵性能向上を目的として、プラズマを利用した集塵方式を、微粒子の帯電とその捕集の二つの現象に切り分け、組み合わせて解析する手法を開発した。印加電圧や電極形状などの最適化を図ることで、2015年の当社製エアコンSDRシリーズにおいて集塵性能基準の2倍となる空気清浄適用床面積16畳を実現した。

Attention has been focused in recent years on the adverse effects of particulate matter of $2.5\mu\text{m}$ or less in diameter (PM2.5) on the human body, particularly on the respiratory system. There is consequently an increasing need for indoor air purification and particle collection technologies.

To address this issue, Toshiba has developed and released the only room air conditioners in Japan that comply with the HD-128 purification standard for PM2.5 specified by the Japan Electrical Manufacturers' Association (JEMA). We have now developed plasma analysis technologies for the electric particle collectors of these air conditioners, which employ plasma air purification, by combining numerical analyses for two phenomena-the plasma-induced charging of particles and the collection of charged particles-aimed at strengthening particle collection performance. Through optimization of parameters including the applied voltage and the shape of the electrodes based on the results of these analyses, the SDR series room air conditioners released in 2015 achieve double the particle collection performance specified by the HD-128 standard.

1 まえがき

PM2.5は大気中に浮遊する粒径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の微小な粒子状物質で、肺胞に入り込んで沈着する可能性があり、人体への悪影響が心配されている。また、環境基準が定められており、監視物質の一つとして1時間ごとの濃度分布が環境省から公表されている⁽¹⁾。最近では、中国の大気汚染問題に由来して、中国から日本へのPM2.5飛来も懸念されている。健康懸念の拡大に伴い、家庭内やオフィス内の空気を清浄化する集塵技術が重要になっている。

東芝は国内で唯一、集塵性能基準HD-128に適合した、PM2.5対応のエアコン⁽²⁾を販売している（図1）。一般に集塵方式にはフィルタ方式と電気集塵方式があり、当社製エアコンではプラズマを利用した電気集塵式を採用している。ここではその構造と特徴について述べる。

2 電気集塵方式の概要

電気集塵ユニットを室内機の熱交換フィン上流に搭載し、ユ

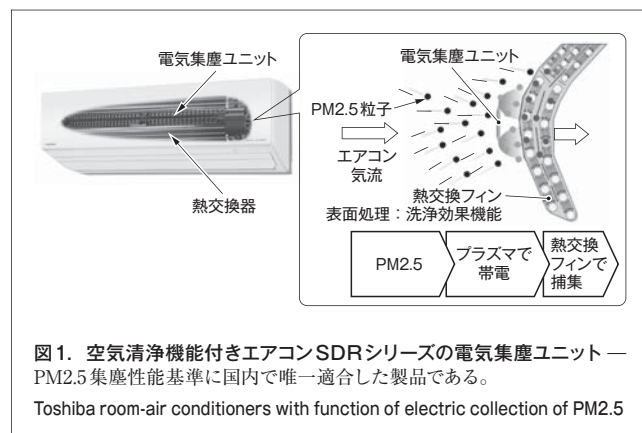


図1. 空気清浄機能付きエアコンSDRシリーズの電気集塵ユニット — PM2.5集塵性能基準に国内で唯一適合した製品である。

Toshiba room-air conditioners with function of electric collection of PM2.5

ニット内の針電極と熱交換フィンとの間に高電圧を印加して放電させ、PM2.5を帯電させて、熱交換フィンで集塵する。熱交換フィンは親水処理されており、付着した汚れはドレン水とともに屋外へ自動排出される。

冷却機能と集塵機能を熱交換フィンに共有させたプラズマ電気集塵方式の採用により、コンパクトサイズでありながら、低い通風抵抗、冷暖房省エネ性能、メンテナンスフリー性能、及び高い集塵性能を兼ね備えたシステムが実現されている。集塵性能を示すJEM^(注3)空気清浄適用床面積は、2014年度のGDRシリーズが約8畳で、国内唯一のHD-128適合モデルであったが、2015年度のSDRシリーズでは約16畳が達成され、更に集塵性能が向上した（図2）。

(注1) 2015年4月現在、家庭用エアコンにおいて、当社調べ。
(注2) 一般社団法人 日本電機工業会（JEMA）のPM2.5に関する自主基準。0.1～ $2.5\mu\text{m}$ の微小粒子状物質を 32m^3 （約8畳）の密閉空間で99%除去する時間が90分以内であること。
(注3) JEMAが取扱製品基準表に定める電気機器の設計や、製造、試験、使用などに関わる規格。

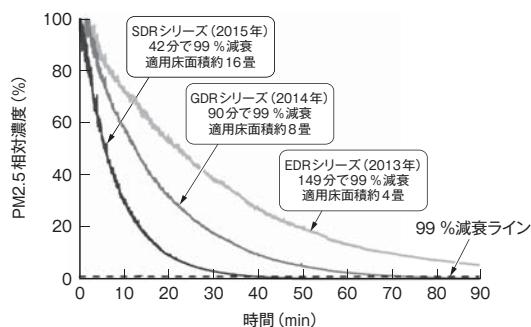


図2. 集塵性能の向上 — 集塵性能は年々向上しており、2014年のGDRシリーズ以降は集塵性能基準HD-128に適合している。

Trends in PM2.5 electric collection performance of Toshiba room-air conditioners

SDRシリーズの開発にあたり、集塵特性の明確化と、GDRシリーズからの大幅な集塵性能向上を目的として、プラズマ電気集塵をPM2.5の帯電とその捕集の連続した二つの現象に切り分け、両者を組み合わせて解析する手法を開発した。

3 プラズマ電気集塵ユニット

プラズマ電気集塵ユニットの概要を図3を用いて説明する。熱交換フィンを接地し、針電極に数kVの負電圧を印加すると、針電極の先端に小さなコロナプラズマが発生し、そこで生成された電子やイオンは周囲に広がりながら帯電領域を作り、通過するPM2.5に付着して負に帯電させる。帯電したPM2.5は、針電極周りの電界のゆがみに起因するクーロン力によって横方向にも広がりながら、気流に乗って熱交換フィンの方向に流れる。そしてフィンの間を通過する際に帯電したPM2.5の一部が熱交換フィンに衝突して捕集される。

電気集塵性能（集塵処理速度） Q (m^3/min) は、式(1)に示すように、PM2.5が集塵ユニットを1回通過するときの帯電効率 η_1 と、捕集効率（帯電したPM2.5が捕集される効率） η_2 、

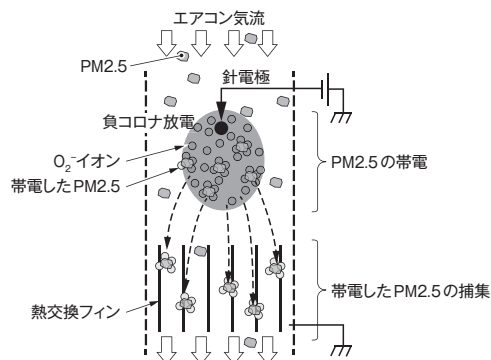


図3. プラズマ電気集塵ユニット — 集塵性能は、プラズマによるPM2.5の帯電性能と、帯電したPM2.5の熱交換フィンによる捕集性能で決まる。

Mechanism of PM2.5 electric collector using plasma generated by DC corona discharge

及び気流量 q (m^3/min) の3要素で決定される。また N は針電極の数であり、針電極は全て同じ特性とした。

$$Q = N \cdot q \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \quad (1)$$

4 PM2.5の帯電特性解析

4.1 コロナプラズマ解析モデル

解析は、米国 テキサス大学と共同開発した、連続体モデルのプラズマ解析コード^{(4), (5)}を用い、電極1本分の放電領域で2次元非定常解析した。針電極先端において微細化した解析格子(図4(a))を用い、各格子においてボアソン式、化学種の保存式、エネルギー収支式、及びイオンの運動量保存式を解いた。左右は鏡面境界としている。針電極長さ及び電極間隔はそれぞれ5 mm及び20 mmである。反応モデルは12種の化学種(窒素分子(N_2)、酸素分子(O_2)、酸素原子(O)、オゾン(O_3)、二窒素カチオン(N_2^+)、二酸素カチオン(O_2^+)、四窒素カチオン(N_4^+)、四酸素カチオン(O_4^+)、二酸化二窒素カチオン(N_2O_2^+)、電子(e^-)、二酸素アニオン(O_2^-)、及び酸素原子アニオン(O^-)を用い、35式の気相反応と16式の電極上の表面反応を考慮した。

局所電界で生成する大気圧コロナプラズマでは、電界や密度の勾配が非常に大きく、その解析は不安定で困難となりやすい。しかし、次に示す(1)~(3)の条件を与えることによって安定したコロナプラズマ解析が可能になり、高電圧印加開始後約0.5 μs で定常状態となる解析結果が得られた。

(1) 解析格子(最小10 μm)と時間刻み(2 p (ピコ: 10^{-12})s)の最適化

(2) プラズマ発光分布から、プラズマ初期密度分布を与える

(3) 電極上の電子境界条件を表面反応フラックスで与える

計算時間は4並列計算で3日を要した。解析の結果大気放電の場合では、PM2.5(密度 $\sim 1 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$)に付着するのは、電子(同 $\sim 1 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$)ではなく、 O_2^- イオン(同 $1 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$)が支配的であることがわかった。

4.2 コロナプラズマ帯電解析結果

定常状態後のコロナプラズマ解析結果を図5に示す。図中

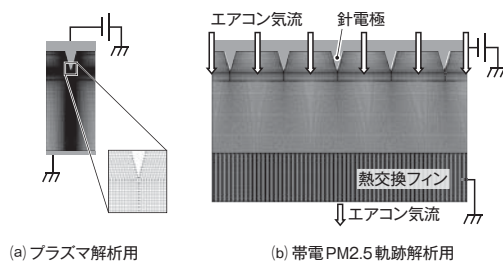
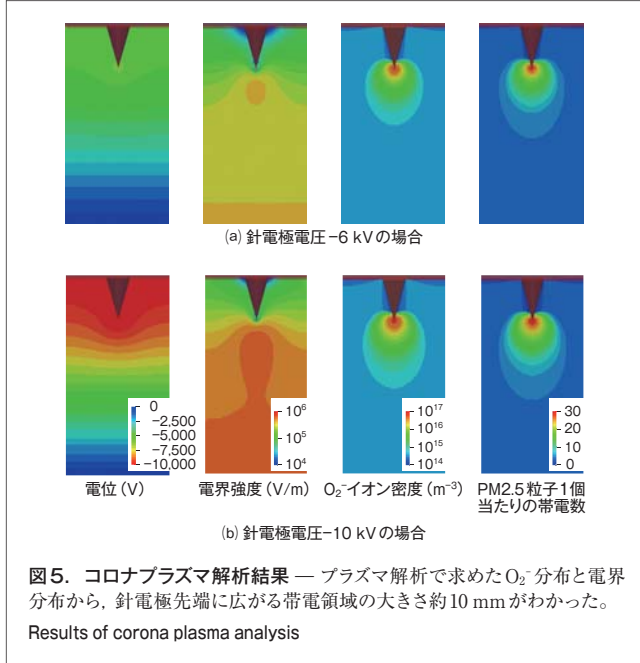


図4. 計算に用いた解析格子 — 針電極先端の解析格子を微細化した。

Grids for plasma analysis and particle tracking



左から電位、電界強度、 O_2^- 密度、及び算出したPM2.5の帯電数の分布であり、(a)及び(b)は印加電圧がそれぞれ、-6 kV及び-10 kVの場合の結果である。放電初期に針電極先端の放電で生成された電子は、強電界で外方向に飛散しながら O_2 と衝突して付着し、 O_2^- になる。その分布は、熱交換フィン側に少し伸びた、10 mm程度の大きさの非球形分布となることが解析からわかった。この分布は、高感度CCD（電荷結合素子）を用いたプラズマ発光強度観測から通常推定されるプラズマ分布（励起された分子の密度分布を表す直径約2 mmの球形）とは大きく異なる、実験では観測できない結果である。コロナプラズマ解析の有用性を示しているといえる。

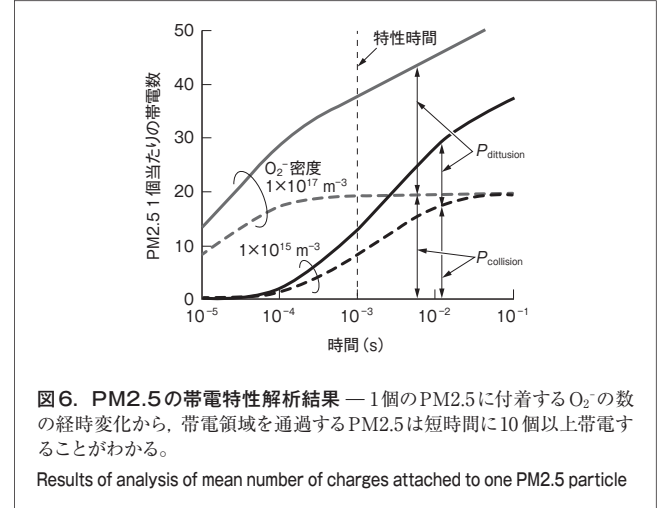
更に、この解析結果（電界及び O_2^- 分布）、並びに O_2^- とPM2.5の帯電特性式⁽³⁾を用いて、PM2.5の帯電数（粒子1個に付着する O_2^- の数）の経時変化を計算した。帯電には、電界加速された O_2^- との衝突による衝突帯電 $P_{\text{collision}}$ （式(2)）と、拡散する O_2^- の付着による拡散帯電 $P_{\text{diffusion}}$ （式(3)）を考慮した。

$$P_{\text{collision}} = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \frac{4\pi\varepsilon_0 E a^2 B_i n_i t}{4\varepsilon_0 + e B_i n_i t} \quad (2)$$

$$P_{\text{diffusion}} = \frac{4\pi\varepsilon_0 a k T}{e^2} \log_e \left(1 + \frac{a U_i n_i e^2 t}{4\varepsilon_0 k T} \right) \quad (3)$$

ここで、 ε_0 は真空誘電率、 k はボルツマン定数、 t は時間である。また、 ε は比誘電率（10）、 E は電界強度（ 5×10^5 V/m）、 a はPM2.5の半径（たばこ粒子を想定して $0.15 \mu\text{m}$ ）、 B_i は電気移動度（ $1.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ ）、 n_i は O_2^- 密度（ 1×10^{15} 又は $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ ）、 T は絶対温度（300 K）、 U_i は O_2^- の平均熱速度（520 m/s）であり、それぞれかっこの数値を仮定して計算した。

衝突による帯電数と拡散による帯電数の、時間による変化



を図6に示す。図中の黒線とグレー線は、 O_2^- 密度 n_i がそれぞれ $1 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 及び $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ の場合であり、実線と破線はそれぞれ、合計帯電数（ $P = P_{\text{collision}} + P_{\text{diffusion}}$ ）及び $P_{\text{collision}}$ を表す。中央の縦の破線は、特性時間1 ms（PM2.5が約1 mm移動する時間）を示しており、この時刻における帯電数をその条件での特徴的な量と定義し、目安として用いる。 O_2^- 密度が $1 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 及び $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ の場合の帯電数はそれぞれ、13個（衝突帯電数8個、拡散帯電数5個）及び38個（同19個、19個）となった。すなわち、 O_2^- が $1 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 以上の領域を通過したPM2.5はほとんどが、10個以上の O_2^- で帯電していることが明らかとなった。

図5の右端のように、10個以上帯電する領域（帯電領域）は約10 mmの楕円（だえん）型の分布となり、この解析結果は、たばこを用いた集塵試験時に熱交換フィンに付着する汚れの分布（10 mm程度の楕円範囲）に近く、解析の妥当性が裏づけられた。

印加電圧-6 kVと-10 kVで帯電領域を比較すると、-10 kVでは O_2^- 密度で15 %、面積で20 %大きくなっており、PM2.5の η_1 が高電圧化で約1.2倍に増加したことがわかった。

5 帯電PM2.5の捕集特性解析

5.1 帯電PM2.5の軌跡解析モデル

図4(b)に示す5本の針電極と熱交換フィンを含めた空間で、帯電したPM2.5が静電場から受けるクーロン力と、空気摩擦力を計算し、個々のPM2.5の動きを追跡した。4章で求めた帯電数の分布を参考にして、初期分布として針電極先に配置する帯電PM2.5の個数を求めた。ここで、印加電圧を-10 kV、気流速度を1.0 m/s、PM2.5の粒子径を $0.3 \mu\text{m}$ 、及び密度を 1.0 g/cm^3 とし、計算の効率化のため帯電数は10とした。熱交換フィンに衝突した帯電PM2.5は消失するモデルとなっていて、 η_2 は、 $[1 - (\text{フィンを通過する粒子数} / \text{初期配置したPM2.5の個数})]$ と定義した。

5.2 帯電PM2.5の軌跡解析結果

針電極先端に生成された帯電PM2.5が熱交換フィンで捕集されて消えていくようすを図7に示す。図中で色分布は電位を示し、白点は三つの時刻(0, 2, 及び10 ms)における帯電PM2.5の位置を表す。

解析例として、 η_2 の帯電数依存性を図8(a)に示す。帯電していない場合($\eta_2=18\%$)から始まり、帯電数増加とともに η_2 は急激に増加し、10個程度の帯電以降大きく変わらず、60%程度が捕集されることがわかった。これは、帯電数増加に伴うクーロン力の増加により、横方向だけでなく熱交換フィン方向への加速も増加するため、横方向への移動距離は大きく変わらず、多くの熱交換フィンに分散することによる捕集効率の改善効果が少ないためである。この結果はモデルで仮定した帯電数10と整合し、モデルの妥当性を裏づけるものである。

また、 η_2 の針電極長さ依存性を図8(b)に示す。横軸と縦軸はそれぞれ、2014年GDRシリーズの針電極長さ η_2 を基準としたときの、相対的な電極長さ η_2 である。黒いプロットで示したように、針電極長さの増加とともに η_2 は増加していき、約2倍の長さで飽和傾向を示した。この解析結果は、針電極長さを変えてたばこの煙で行った集塵性能試験結果の傾向(図中グレーのプロット)と良い一致を示した。これは、針電極長さ η_1 は大きくは変わらず、長い針電極では電極間に負

電位がより深く入り込むため、横方向への電界強度が増加し、PM2.5がより分散して熱交換フィンに到達して η_2 が改善されたためと考えられる。

η_2 を向上させるためには、針電極間の横方向の電界の増強が重要であり、2倍程度の長い針電極がより良いことがわかった。

6 あとがき

PM2.5に対応した当社製家庭用エアコンのプラズマ電気集塵システムに対して、帯電と捕集の二つの現象に注目し、両者を組み合わせて解析する集塵特性解析手法を開発した。

この解析により、PM2.5の帯電特性と捕集特性が明確になり、電極形状や印加電圧などの集塵性能への影響が解析できるようになった。解析結果に基づき、高電圧化(η_1 を1.2倍)と、電極形状の最適化(η_2 を1.2倍)を実施した。更に、ユニット拡大による電極数増加(N を1.4倍)と合わせて、2015年SDRシリーズではGDRシリーズに比べて集塵性能が2倍となり、JEM空気清浄適用床面積16畳を達成した。

今後は、更に解析精度を向上させて、高性能で効率の良いエアコンの製品化に貢献していく。

文 献

- (1) 環境省. "大気環境・自動車対策". 環境省ホームページ. <<http://www.env.go.jp/air/osen/pm/info.html>>, (参照 2015-06-15).
- (2) 東芝. "東芝エアコンSDRシリーズ". 東芝ホームページ. <http://www.toshiba.co.jp/living/air_conditioners/pickup/sdr/>, (参照 2015-06-15).
- (3) Yuan, X. et al. Computational Study of Capacitively Coupled High-Pressure Glow Discharges in Helium, IEEE Transactions on Plasma Science. 31, 4, 2003, p.495-503.
- (4) Hayashi, H. et al. "Fine ion energy control for sub-32 nm node device RIE using pulsed-DC superimposed 100 MHz rf CCP". 63rd Annual Gaseous Electronics Conference and 7th International Conference on Reactive Plasmas. American Physical Society, Paris, France, 2010-10, American Physical Society. 2010.
- (5) 高橋幹二. エアロゾル学の基礎. 東京. 森北出版, 2003, 240p.

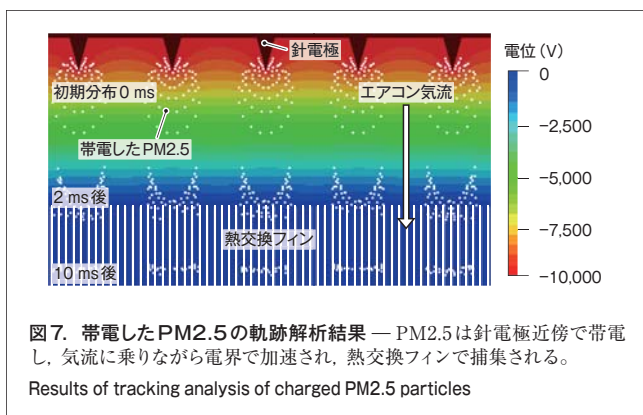


図7. 帯電したPM2.5の軌跡解析結果 — PM2.5は針電極近傍で帯電し、気流に乗りながら電界で加速され、熱交換フィンで捕集される。

Results of tracking analysis of charged PM2.5 particles

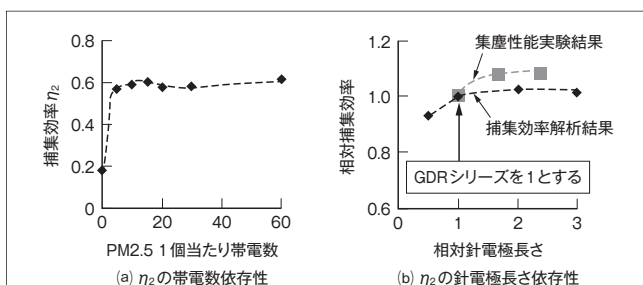


図8. 帯電したPM2.5の捕集効率解析結果 — 帯電PM2.5の捕集効率の帯電数及び電極長さ依存性の解析により、針電極形状を改良できた。

Results of analysis of dependence of efficiency of charged particle collection on number of charges and electrode length



宇井 明生 UI Akio

研究開発統括部 研究開発センター 機械・システムラボラトリー主任研究員。プラズマ応用技術の研究・開発に従事。応用物理学会, 化学工学会会員。
Mechanical Systems Lab.



佐藤 陽介 SATO Yosuke

研究開発統括部 研究開発センター 機械・システムラボラトリー。プラズマ応用技術の研究・開発に従事。応用物理学会会員。
Mechanical Systems Lab.



関 勇輔 SEKI Yusuke

東芝キャリア(株) RAC設計部 RAC設計第一担当。家庭用エアコンの空気清浄機能開発に従事。
Toshiba Carrier Corp.