情報作業環境における情報処理機器を対象とした室内空気質(IAQ)評価手法の提案

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-11-16 キーワード (Ja): キーワード (En): Information Working Environment, Information Processing Device, Printer, Particle Formation, Indoor Air Quality, Non-volatile Residue 作成者: 江見, 準, Emi, Hitoshi メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00048946

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.

情報作業環境における情報処理機器を対象とした室内空気質（IAQ）評価手法の提案

（課題番号　13450315）

平成 13 年度～平成 14 年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(1)）
研究成果報告書

平成 15 年３月

研究代表者　江見　準
（金沢大学工学部教授）

はしがき

現在の情報作業環境では，各自のパソコンおよびプリンター・スキャナー等の入出力機器がネットワーク（LAN）で相互にサーバーを介して接続されている。特に，ネットワーク化に伴う作業の個別化が進行している作業環境では，用途・仕様の異なる入出力機器が同室内に複数台配置されることにより，機器の設置密度は相対的に高くなっているのが現状である。その中でも，レーザー（電子写真式）プリンタは，トナー粉を用いた電子写真技術を使用しており，画像露光時のコロナ放電使用によるオゾンの発生，定着時およびクリーニング時の未定着トナー粒子の飛散による粒子発生等により，作業環境の室内空気質（IAQ）に悪影響を及ぼすことが懸念される。また，インクジェット形式のプリンタでも，同様にインクミストの飛散が懸念される。オゾンに関しては，規制値が設けられており，帯電機構の改良により発生量の低減を図ることが可能とされている。一方，粒子に関しては，印字解像度の向上，カラー印字化によるトナー粒子の微小化・高機能化，および印字速度の高速化によるトナー粒子の再飛散や印刷紙との摩擦による紙自身からの発塵量の増加が予想される。しかし，現在我が国では，これらを発生源とする粒子の規制は全く行われていないのが現状である。一方，欧州では，ドイツの Blue Angle 規格をもとに規制がなされているが，十分な評価法とは言い難い。そこで本研究では，情報処理機器の設置密度の高い情報作業環境の実態に即し，主にプリンタからの発塵粒子を対象とした新たなIAQ評価手法を提案することを目的としている。

研究組織

研究代表者：　江　見　　準　（金沢大学工学部教授）

研究分担者：　大　谷　吉　生　（金沢大学工学部教授）

研究分担者：　並　木　則　和　（金沢大学工学部助手）

研究分担者：　藤　井　修　二　（東京工業大学大学院情報理工学研究科教授）

研究分担者：　鍵　　直　樹　（東京工業大学大学院理工学研究科助手）

交付決定額（配分額）　　（金額単位：千円）

	直接経費	間接経費	合　計
平成13年度	11,600	0	11,600
平成14年度	2,200	0	2,200
総　計	13,800	0	13,800

研究発表

(1). 学会誌等

1) N. Namiki, Y. Otasni, P. Kulkarni, P. Biswas: "Effective Collection of Ultrafine Particles with Soft X-ray Irradiation under Applied Electric Field and /or Corona Discharge", Proc. of 16th ISCC, pp.16/1-16/10, 2002.4

2) 伊藤隆夫，並木則和，江見準，大谷吉生："イオン化と静電分離を利用したガス純化技術"，エアロゾル研究，Vol.17, No.2, pp.115-121, 2002.6

3) Electrostatic Separation of Volatile Organic Compounds by Ionization, Environmental Science & Technology, Vol.36, No.19, pp.4170-4174, 2002.8

4) 坂野健夫，大谷吉生，並木則和,江見準："単分散粒子に対する中性能繊維層フィルタ集塵性能の経時変化予測"，エアロゾル研究，Vol.17, No.3, pp.185-190, 2002.9

（2）．口頭発表

1) 坂野健夫，大谷吉生，並木則和，江見　準："粉塵負荷時の繊維層フィルタの集塵性能予測"，第 20 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会，日本空気清浄協会，東京，2002.4

2) 並木則和，大谷吉生，江見準，鍵直樹，藤井修二："プリンタからの発塵を対象とした IAQ 評価"，日本建築学会 2002 年度大会（北陸），日本建築学会，金沢，2002.8

3) 並木則和，江見　準，大谷吉生，P. Kurkarni, P. Biswas: "コロナ放電と軟X線照射による超微粒子の高効率捕集"，第 19 回エアロゾル科学技術討論会，日本エアロゾル学会，京都，2002.8

4) T. Saklano, Y. Otani, N. Namiki, H. Emi: "Prediction of Pressure Drop of Medium Performance Fibrous Filter for Monodisperse Particles", The 6th International Aerosol Conference, International Aerosol Research Assembly, Taipei, 2002.9

5) T. Ito, N. Namiki, H. Emi, Y. Otani: "Electrostatic Separation of Trace Gas Component by Photo-ionization", 6th International Aerosol Conference, International Aerosol Research Assembly, Taipei, 2002.9

6) 笠島裕希，並木則和，江見準，大谷吉生："温湿度変化によるたばこ副流煙粒子の物理的・化学的性状の変化"，第 35 回化学工学会秋季大会，化学工学会，神戸，2002.9

— 目　次 —

I　各種プリンタからの発塵粒子の特性とその評価
第１章　プリンタの概要およびプリンタから発生する物質の評価法　1
1-1　プリンタの種類と販売台数　1
1-2　プリンタの印刷機構　2
1-2-1　インクジェットプリンタの印刷機構　2
1-2-2　インクジェット用インク　5
1-2-3　レーザープリンタの印刷機構　6
1-2-4　トナー　9
1-3　プリンタのからの汚染物質の発生に関する評価法　11
1-4　プリンタからの汚染物質の発生に関する既往の研究　12
第２章　発塵試験装置の概要および発塵粒子の測定法　13
2-1　発塵試験装置　13
2-2　発塵量の時間変化および総発塵量，粒径分布　15
2-3　発塵粒子の形状観察および組成分析の方法　16
2-4　試験体各部位の発塵量　17
2-5　帯電量分布　17
2-5-1　帯電量分布の測定原理　17
2-5-2　透過率の測定　21
第３章　インクジェットプリンタからの発塵粒子の特性　28
3-1　実験装置および方法　28
3-2　実験結果および考察　29
第４章　モノクロレーザープリンタからの発塵粒子の特性　37
4-1　実験方法　37
4-2　実験結果および考察　38
第５章　カラーレーザープリンタからの発塵粒子の特性　46
5-1　実験方法　46
5-2　実験結果および考察　46

第６章　発塵機構に関する考察　50
6-1　プリンタ内部の空気の流れ　50
6-2　発塵粒子の生成機構　51
6-3　発塵量低減の対策　57
第７章　結論　59
Nomenclature　62
参考文献　63

II　プリンタの化学物質発生特性と室内空気汚染
第１章　プリンタによる室内空気汚染　64
1-1　室内空気質　64
1-2　プリンタから発生する汚染物質　66
1-2-1　汚染物質の概要　67
1-2-2　汚染物質の発生機構　73
1-3　汚染物質の測定方法　75
1-3-1　オゾンの測定方法　75
1-3-2　粒子の測定方法　77
1-3-3　ＶＯＣの測定方法　78
第２章　プリンタの存在する室内空気質の実測　81
2-1　実測方法　81
2-2　実測の結果　86
2-2-1　微粒子　86
2-2-2　オゾン　86
2-2-3　VOC　86
2-3　考察　102
2-3-1　微粒子　102
2-3-2　オゾン　102
2-3-3　VOC　103
第３章　プリンタから発生する汚染物質のチャンバーを用いた測定　110

3-1　チャンバー実験　106
3-1-1　チャンバーの概要　106
3-1-2　チャンバー実験の方法　108
3-2　実験結果　110
3-2-1　温度・湿度　110
3-2-2　オゾン　110
3-2-3　VOC　110
3-3　考察　117
3-3-1　温度・湿度　117
3-3-2　オゾン　117
3-3-3　VOC　118
第４章　結論　120
4-1　本研究のまとめ　120
4-2　今後の課題　121
参考文献　122

I　各種プリンタからの発塵粒子の特性とその評価

第１章　プリンタの概要およびプリンタから発生する物質の評価法
第２章　発塵試験装置の概要および発塵粒子の測定法
第３章　インクジェットプリンタからの発塵粒子の特性
第４章　モノクロレーザープリンタからの発塵粒子の特性
第５章　カラーレーザープリンタからの発塵粒子の特性
第６章　発塵機構に関する考察
第７章　結論

I　各種プリンタからの発塵粒子の特性とその評価

第1章　プリンタの概要およびプリンタから発生する物質の評価法

1-1　プリンタの種類と販売台数

現在，主に市販されているプリンタは，Fig.1-1[1)]に示すように，多機能プリンタ，レーザープリンタ，インクジェットプリンタ，熱転写式プリンタ，ドットマトリックスプリンタなどに分類することができる。この中で，熱転写式プリンタ，ドットマトリックスプリンタは，現在では限られた用途のみで使用されるため，販売台数は減少傾向にある。また，多機能プリンタは，プリント機能のほかにFAXやスキャナーなどの機能が付いているものである。全体の動向としては，2000年に急増して，1996年に比べ約2倍程度となり，その後は一旦減少しているが，将来にわたって増加が予想される。内訳は，家庭用などに多く普及しているインクジェットプリンタが飛躍的に販売台数を伸ばしており，現在ではプリンタ全体の8割以上を占めている。

本研究では，そのうちで，現在主流となっている印刷方式であり，発塵量も多いと考えられるインクジェットプリンタとレーザープリンタの2種類を対象とした。

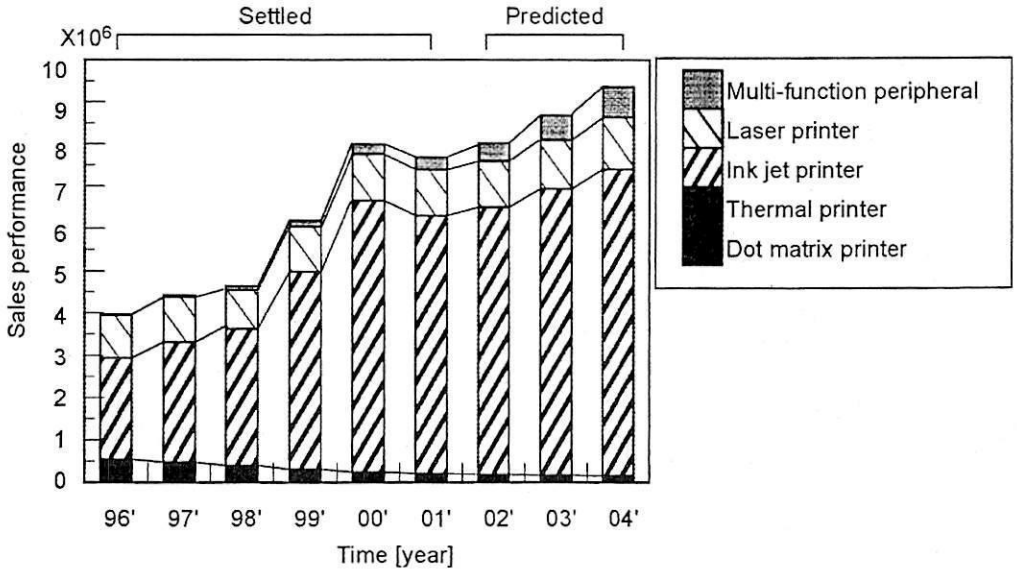


Fig.1-1 Sales performance of printers in Japan.

1-2　プリンタの印刷機構[3~5]

ここでは，前述の2種類のプリンタの印刷機構と，印刷に用いるインク，トナーについて述べる。

1-2-1　インクジェットプリンタの印刷機構

インクジェットプリンタは，大きく分類するとコンティニュアス型とオンデマンド型に分けられる。コンティニュアス型では，常にインクの吐出が行われており，必要に応じて電荷をかけることにより用紙に向かってインクを吐出する。コンティニュアス型は，工業用などの大量に印刷する際に有効な方法で，工業用プリンタとして広く用いられている。一方，オンデマンド型は，コンティニュアス型に比べ必要な時だけインクを吐出させるためインクの消費量を抑えられる，コンティニュアス型に比べ比較的簡単な構造になる等の理由により，一般用プリンタに適しており一般家庭などで広く使用されている。ここでは，一般向けに用いられているオンデマンド型プリンタの印刷方式のサーマルインクジェット方式（代表例：キャノン社のBJ方式）とピエゾ方式（代表例：セイコーエプソン社のMACH-JET方式）について基本的な原理を説明する。

(i)　サーマルインクジェット方式（TIJ方式）

インクジェットプリンタのインク吐出方式の一つとしてサーマルインクジェット方式（TIJ方式）がある。TIJ方式のインクの吐出方法についてFig.1-2に示す。サーマルインクジェットヘッドでは，ヒータ表面を数マイクロ秒以内に200～500℃まで加熱している。それにより瞬時に一つの気泡を発生させ，インクを吐出する。そして，急激に成長した気泡は，ヒータを急激に冷却することにより急速に収縮する。以上の操作を，一定の条件下で行うことにより一定の大きさの気泡が発生し，その結果均一な大きさのイン

ク滴が高速で吐出されるため，高速なインク滴形成技術として制御しやすい特性を持っている。また，比較的単純な構造であるため複数のノズルを設置することが容易である。しかし，欠点としては加熱によりヒータが断線したり，ヘッドに焦げが生じたりすることが挙げられる。TIJ 方式は，サテライトと呼ばれる印刷に寄与しない微小ミストが多く発生すると言われており，このサテライトがプリンタの発塵の主原因であると予想される。Fig.1-3 に，一般的な TIJ 方式プリンタのインクの吐出状態の写真 [4]および模式図を示す。写真から分かるように，プリンタヘッドからインク柱が伸び，その先端部分が主インク滴となり紙に向かって飛散する。また，インク柱から主インク滴が切れる際にサテライト粒子が発生していることが確認できる。なお，ヒューレット・パッカード，キャノン，ゼロックス，レックスマーク，ブラザー，オリベッティーなどが，この TIJ 方式を採用している。

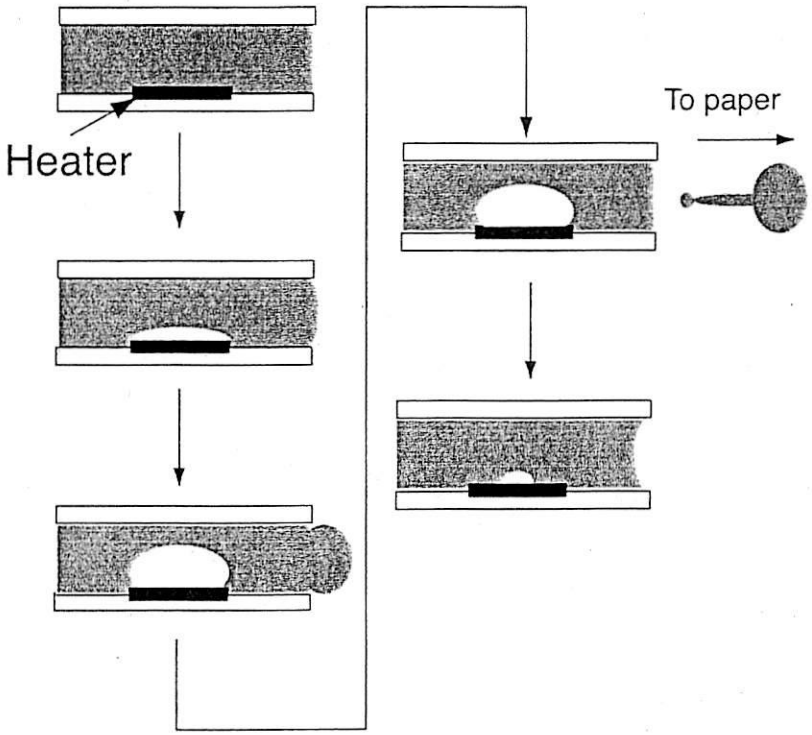
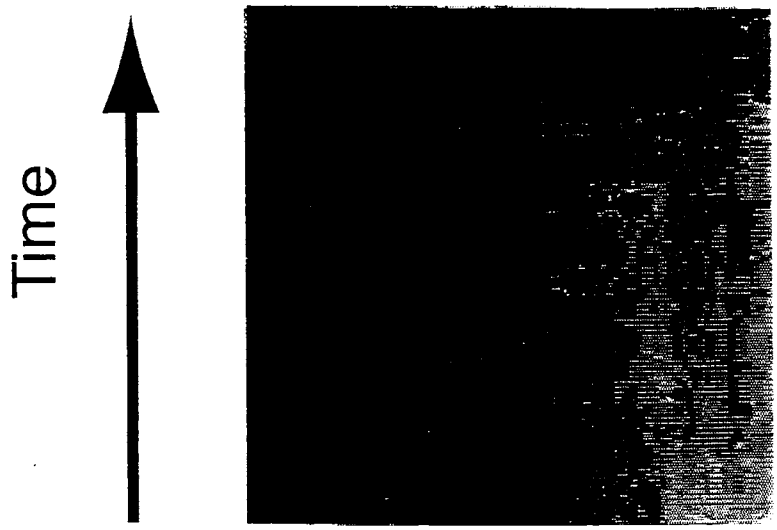
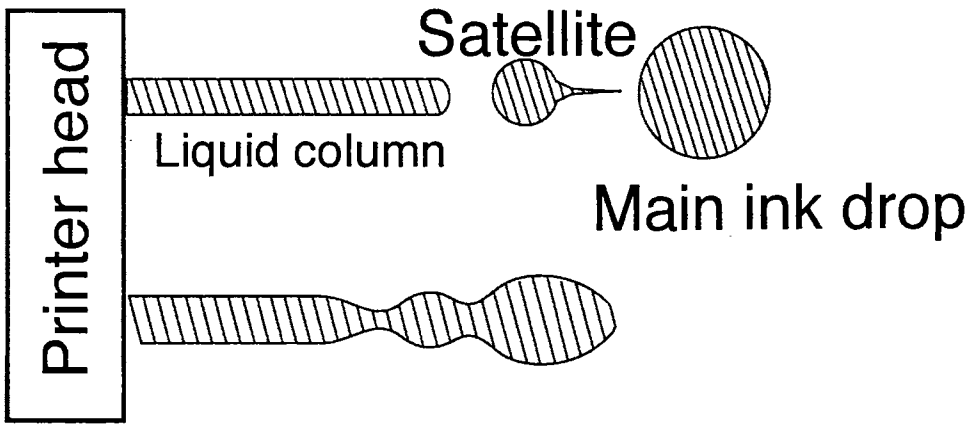


Fig.1-2 Mechanism on printing by thermal ink jet system.



(a)Photograph



(b)Illustration

Fig.1-3 Ink mists discharged from a printer-head nozzle.

(ii) ピエゾ方式

インクジェットプリンタのもう一つのインク吐出方式として，ピエゾ方式がある。ピエゾ方式のインクの吐出方法についてFig.1-4に示す。この方式は，電圧を印加することにより変形する素子（ピエゾ素子）を用い，その変形によりヘッド内のインク収納スペー

スを減少させ，この圧力によりインクを吐出する。ピエゾ方式は，TIJ方式とは異なり，インクに熱がかからずノズル付近でインクの変質が起こりにくい。そのため，インクの目詰まり生じにくく，射出安定性に優れている。欠点としては，気泡が混入した場合に正常な吐出が出来なくなることが挙げられる。セイコーエプソンのインクジェットプリンタが，この方式を採用している。

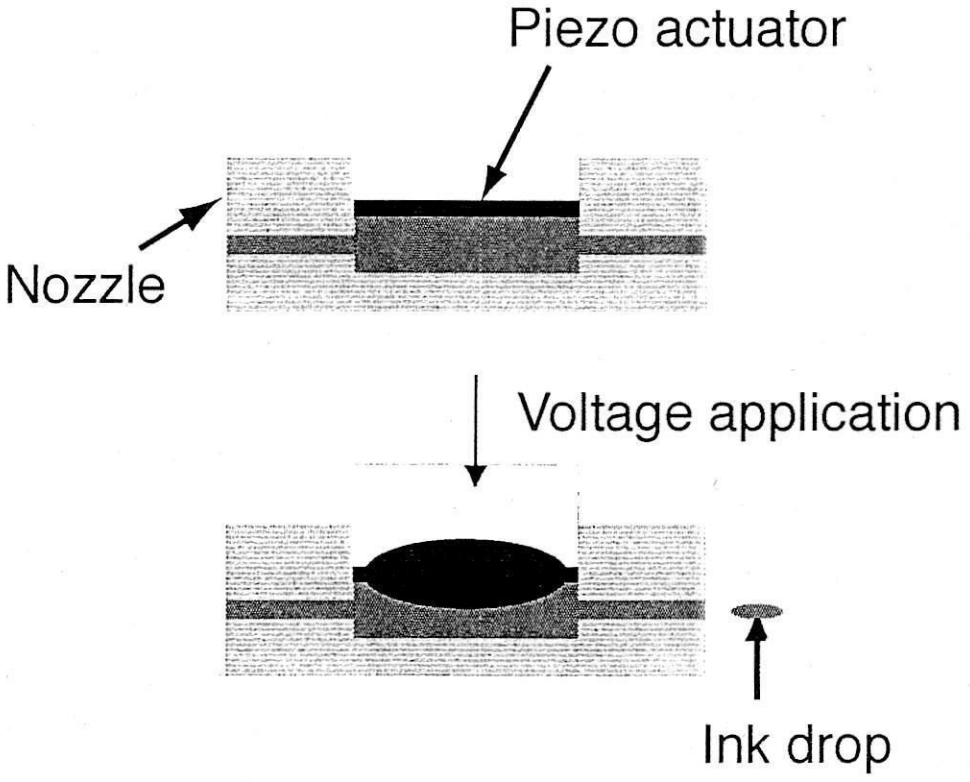


Fig.1-4 Mechanism on printing by piezo-type ink jet printer.

1-2-2　インクジェット用インク

インクジェット印刷に使用するインクの主成分は水であり，その他に，色料として顔料（ pigment ）または染料（ dye ）を用いている。インクの種類は，色材の種類により顔料インクと染料インクに分類されている。顔料インクは，鮮明な印刷が可能であるが，ノズルのつまりを引き起こしやすい欠点を持っている。一方，染料インクでは，ノズルのつまりを起こしにくいが，印刷がにじみやすい欠点を持っている。さらに，乾燥防止剤として，エチレ

ングリコールやグリセリンなどの多価アルコール類などが用いられている。また，浸透剤として水酸化カリウム，pH調整剤として炭酸水素ナトリウムやりん酸など，防腐防かび剤として安息香酸ナトリウムなど様々な化合物が配合されている。

1-2-3　レーザープリンタの印刷機構

(ｉ)　モノクロレーザープリンタの印刷機構

モノクロレーザープリンタは，コピー機でも用いられているゼログラフィという原理を使用して印刷を行っている。印刷工程は，Figs.1-5，6に示すように以下の6つのステップにより行われる。

(1)帯電：感光体ドラムの表面を均一に帯電させる。

(2)露光：感光体ドラムの印刷しない部分に光を当て，除電する。

(3)現像：印刷する画像のある部分の感光性ドラムは正に帯電しているので，トナーは付着し，画像の無い部分は，露光により電荷が除去されているのでトナーは付着しない。

(4)転写：感光体ドラムの上にトナーにより形成された画像は，紙の裏側から正の電荷をかけることにより，紙の表面に転写する。この時点では，トナーは紙の上にのっているだけの状態なので簡単に剥がれる。

(5)定着：転写されたトナーに熱と圧力をかけることにより紙に定着させる。

(6)除電：感光体ドラムに残っている転写されなかったトナーをクリーニングする。ここで，光を全面に当てることにより感光体ドラムを元の状態に戻す。

これら6つのステップを1枚の印刷について1回ずつ行う。

(ii)　カラーレーザープリンタの印刷機構

本研究で用いた，タンデム方式のカラーレーザープリンタの印刷機構をFig.1-7に示す。図に示すように，下からシアン，イエロ

ー，マゼンタ，ブラックの順で，各色のカラートナーカートリッジと感光体ドラムがそれぞれ設置されている。印刷は，前述したレーザープリンタの 6 つの印刷工程のうち， 4 番目の転写までの工程を下のカートリッジから順番に行い，印刷用紙上に各色のカラートナーをのせる。最後に，熱（ 150～200℃）と圧力により定着を行う。

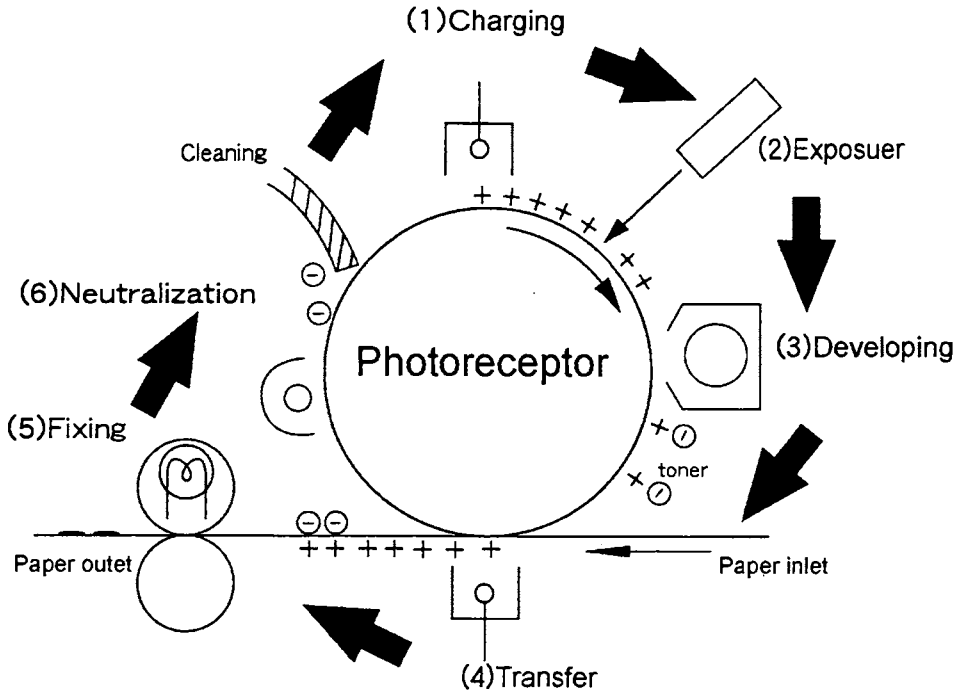


Fig.1-5 Mechanism on printing by laser printer.

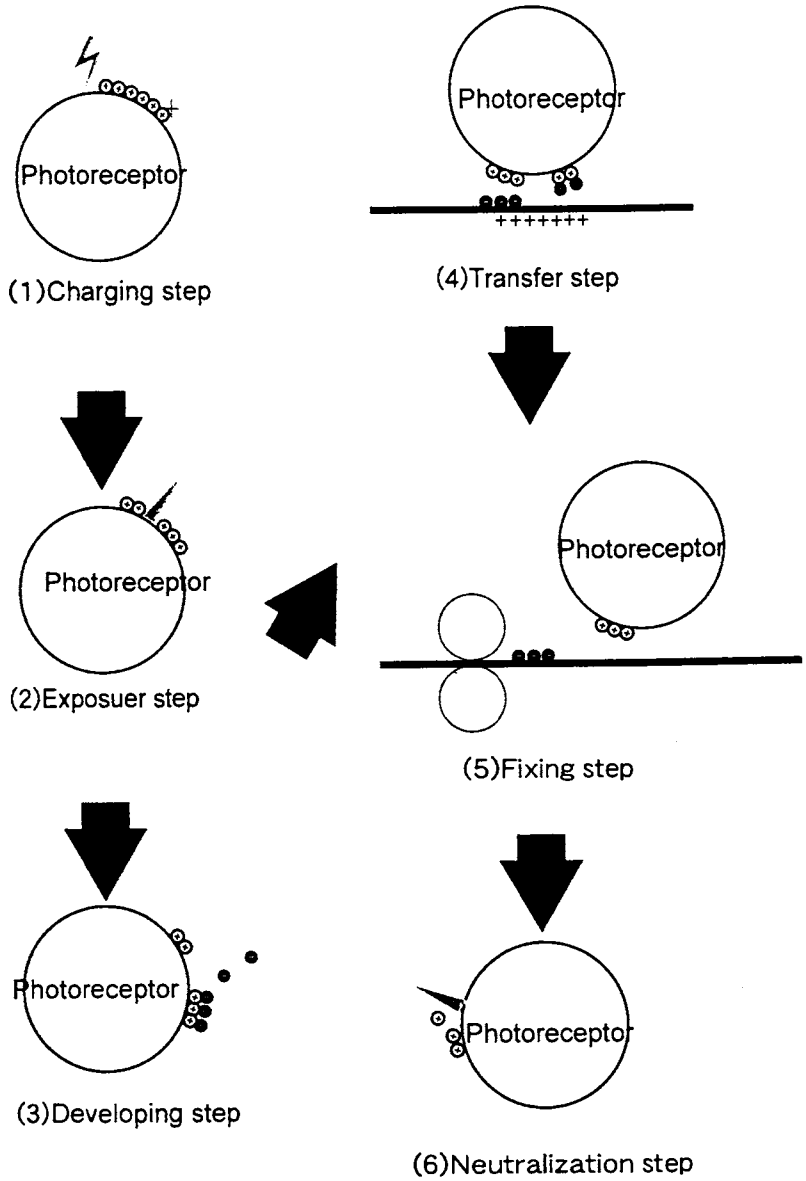


Fig.1-6 Printing steps of monochrome laser printer.

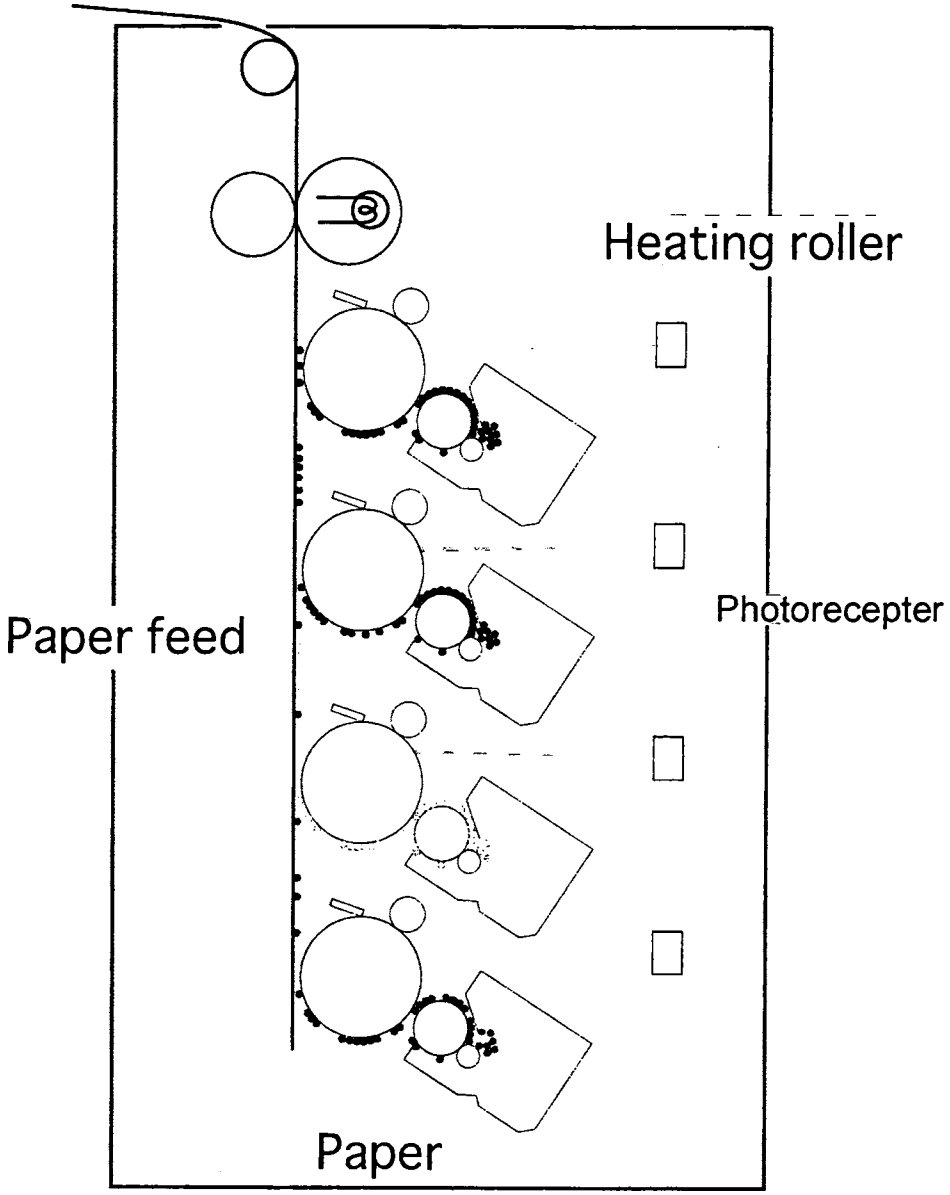


Fig1-7 Mechanism on printing by color laser printer (tandem type).

1-2-4　トナー

一般的に用いられるトナーは，樹脂中に顔料その他添加剤を練り込み，これを 5～20μm に粉砕して製造される， 10mC/kg 程度に帯電可能な粒子である。一般的なトナーの形状を Fig.1-8 に示す。トナーは，色材としての特性以外に，安定した帯電性や現像装置内での流動性など複数の性質を兼ね備えることが必要である。トナーには，乾式トナーと粒子を揮発性の液体中に分散させた湿式トナーがあるが，一般用としては乾式トナーが主流となっている。

また，乾式トナーには，非磁性トナーと磁性トナーがあり，非磁性トナーは，樹脂（ 80～90%），顔料（ 5～15%），耐電制御剤（ Charge control agent: CCA 1～5%），定着特性強化のための添加剤（離型剤）を含み，実用の際には外添剤とよばれる粒径 7～40nm のシリカ系コロイド粒子が添加される場合が多い。一方，磁性トナーでは，これに加えてマグネタイト，その他の磁性粉（ 0.5μm 以下）が 20～60%の濃度まで加えられている。また，カラーレーザープリンタ用のトナーでは，印刷添加剤を加え，定着時に溶融することにより，印刷面をフィルム状にし，凹凸をなくすことにより光の乱反射を抑え，色再現性を向上させている。さらに，添加剤の影響で定着時に定着ローラー上にトナーが付着し易くなり，オフセットが生じる可能性がある。これを防ぐために，油系オフセット防止剤により印刷表面をコーティングしている。

上記した基本的な原理に加えて，製品化する際にメーカーごとに独自の工夫を加えているため，詳しい印刷の機構は不明である。しかし，本研究では，これまで述べた基本的な印刷方式を踏まえて，インクジェットプリンタでは主インク滴およびサテライトが，レーザープリンタでは定着時に加熱された紙およびトナーが発塵の主原因になっていると考えた。

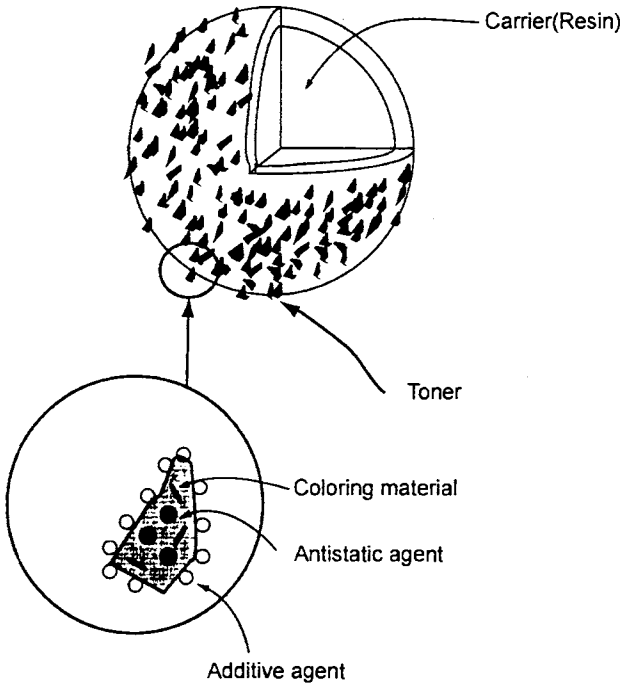


Fig.1-7 Illustration of toner powder.

1-3 プリンタのからの汚染物質の発生に関する評価法

現在，プリンタからの発塵に関する発塵量の代表的な評価法としては，ドイツのブルーエンジェル規格[6)]がある。ブルーエンジェル規格の発生粉塵の評価方法は，25℃±2℃に調節された実験室（容積 50m^3）でプリンタを作動させ，発塵粒子をガラスフィルタで捕集し，その重量を測定するという方法を取っている。そして，連続した 24 時間の平均値が 0.15mg/m^3 以下という基準を設定している。しかし，粒子は粒径が小さくなるほど粒子 1 個あたりの重量は粒径の 3 乗に反比例するため，重量基準の発塵量評価法では，非常に微小な粒子の存在は無視されてしまう。次に，人体に吸入される粒子の沈着部位について考えると[7)]，人体に吸入された粒子の中で粒径の比較的大きいもの（粒径 10μm 以上のもの）の大部分は，咽頭部，喉頭部，あるいは上部気管内に慣性により沈着する。それ以下の粒子は，肺胞などの気管支の奥深くまで侵入し，選択的に沈着する性質があることが報告されている。そのため，プリンタからの発塵粒子を評価する際に，重量基準のみで

評価することは，それらの影響を十分に考慮できていない可能性がある。

1-4 プリンタからの汚染物質の発生に関する既往の研究

発生する汚染物質として，オゾン，スチレン，粉塵などが挙げられる。T. Tuomi ら[8]は，チャンバー内で新品のコピー機の汚染物質の発生量を調べている。それによると，VOC の放出量は印刷速度に関係なく一定だが，チャンバー内の温度上昇や両面印刷にすることによって増加する。人体に取り込まれるような微小粒子の発生量は，アイドリングモードの時と印刷している時で変わらなかった。そのため，機器中の残渣が出ているのではないかと，筆者は推測している。しかし，この測定では発塵粒子の測定に 50 % カットオフ径が 4.0 μm のサイクロンを用いているため，微小粒子に関してはほとんど無視されている。また，S. C. Lee ら[9]は，いろいろな種類の事務機器（ファックス，レーザープリンタ，インクジェットプリンタ，スキャナー，コピー機など）を対象に調査を行っている。測定項目は，各 VOC 濃度，総 VOC 量，オゾン濃度，粒子濃度（PM_{10}）である。この研究でも，対象としている粒子は PM_{10} であり，粒径の小さい粒子に十分に焦点が当てられていない。さらに，E. Nies ら[10]もコピー機とカラーレーザープリンタについてガスと粒子の発生量を測定しているが，この場合でもブルーエンジェル規格に準拠した測定にとどまっている。

以上のように，プリンタからの発塵を測定している研究はあるものの，微小粒子（特にサブミクロン以下）の発塵についての報告は見られない。

第２章　発塵試験装置の概要および発塵粒子の測定法

本章では，本研究で行った発塵試験装置および発塵粒子の測定法について説明する。

2-1　発塵試験装置

Fig.2-1 に発塵試験装置を示す。本装置は，クリーンルーム内の機器の発塵量を測定するための規格である，JIS B9926（クリーンルームで使用する機器の運動機構からの発じん量測定方法）[11] に準拠している。本試験装置では，定格風量が $10m^3min^{-1}$ のシロッコファンおよび，粒径 0.15μm 以上の粒子に対して捕集効率（定格風量時）が 99.995%以上である ULPA（Ultra Low Penetration Air）フィルタで構成された FFU（Fan filter unit）を用いた，小型の簡易クリーンブース（高さ 1.9m×幅 0.8m×奥行き 0.8m）を組み立てて，大型のクリーンブース（ISO クラス 3 以下：高さ 3m×幅 1.4m×奥行き 1.4m）の内側に設置した。この二重のクリーンブース内の清浄環境で試験体を作動させ，バックグラウンド値を低く抑えた状態で，発塵粒子の測定を行った。２つのクリーンブースの風量調整は，インバータ（大型クリーンブース：Mitsubishi FREQROL-U100，小型クリーンブース：Mitsubishi FREQROL-S500）により周波数を変えて制御した。今回使用した SMPS（Scanning Mobility Particle Sizer :TSI 社 Model 3936L22）と，2 台の CNC（Condensation Nucleus Counter: TSI 社 Model 3022A，RION 社 KM-14）の計 3 種類の測定器で測定したバックグラウンド値が，ほぼ 0 個/cc となっていることを確認した上で実験を行った。

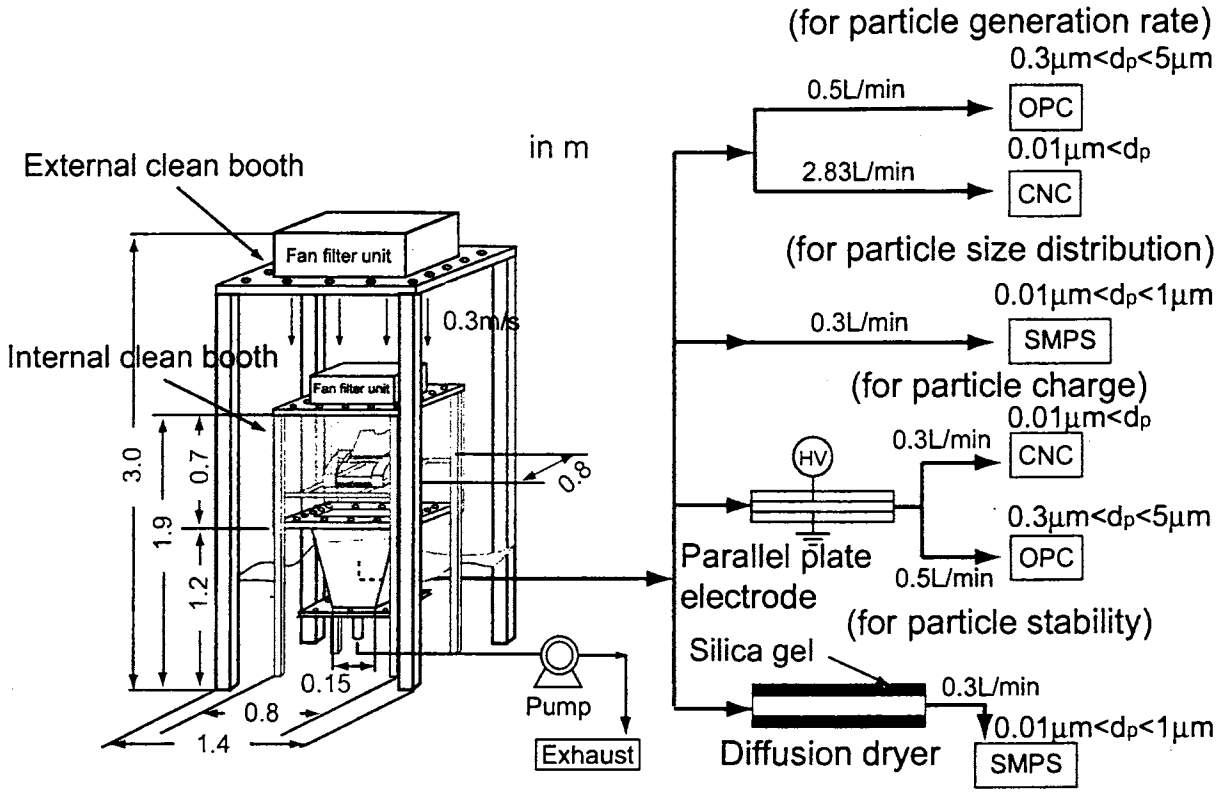


Fig.2-1 Experimental set up for characterization of particles emitted from printers.

SMPS は，Fig.2-2[12] に示すように Electrostatic Classifier （TSI 社 Model 3080 ）および Long DMA （Differential Mobility Analyzer :TSI 社 Model 3081 ），CNC （Condensation Nucleus Counter :TSI 社 Model 3022A-S ），コンピュータの 4 種類の機器を組み合わせた粒度分布測定装置である。SMPS では，DMA に印加する電圧はコンピュータを介して CNC に内蔵されたボードより制御し，印加電圧を指数関数的に変化させることにより，流入時間の相違が引き起こす電気移動度の異なる粒子の同時サンプルを防いでいる。この結果，ある幅を持った電気移動度を持つ粒子のみが CNC に導入される。その時の DMA の印加電圧から分級粒子の電気移動度が，CNC の計数値から粒子個数が分かる。得られた電気移動度分布を逆変換することにより，粒径分布を得ることができる。

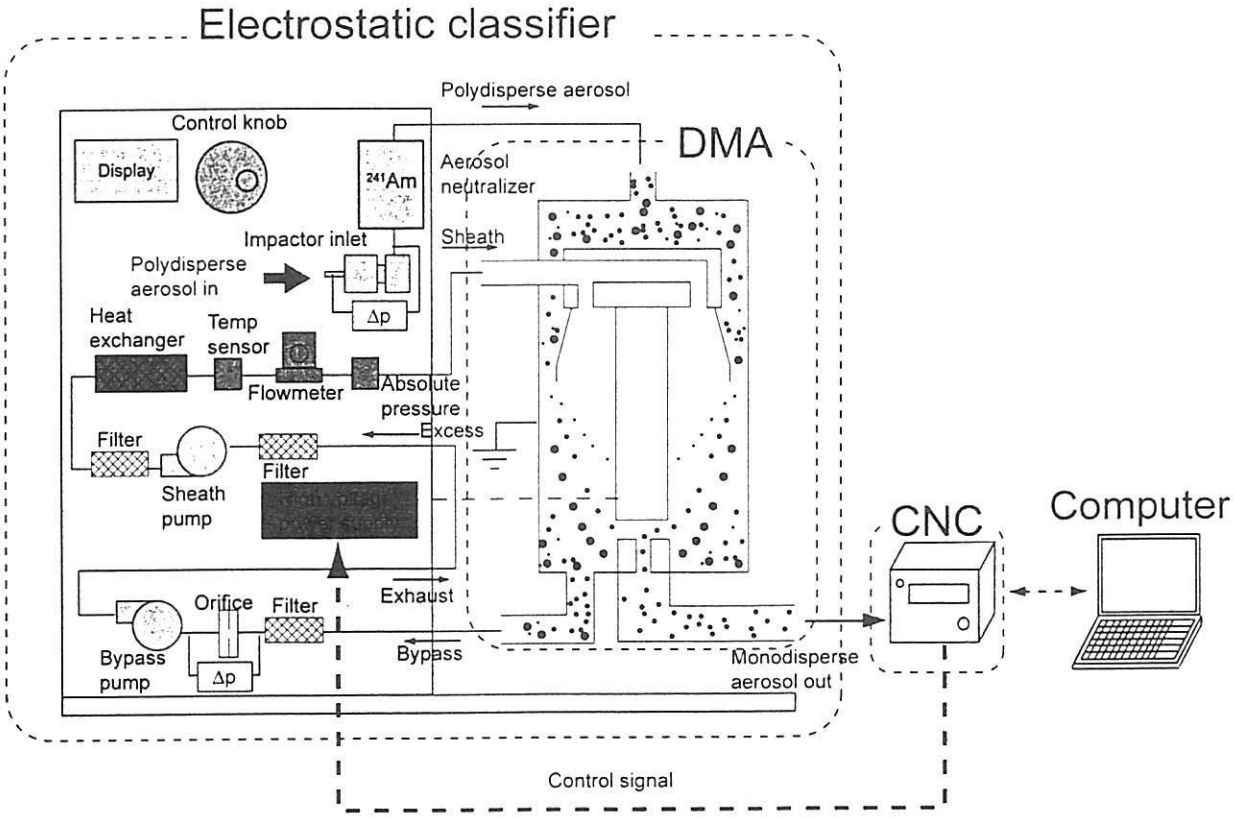


Fig.2-2 Schematic diagram of SMPS.

2-2 発塵量の時間変化および総発塵量，粒径分布

まず，発塵粒子個数の時間変化の測定では，内側のクリーンブース内に設置した試験体から発生させた粒子を内部クリーンブース下部の縮流部より2つに分岐し，2.83L/min（0.1cfm）でCNC（RION社；KM-14）に，0.5L/minでOPC（RION社；KC-01B）に導入した。この際，発塵粒子を迅速に測定するため，内部クリーンブースのFFUから15L/min（断面風速 3.9×10^{-2}m/sec）で送風を行い，縮流部のサンプリング部の下流から12L/minでポンプで吸引を行うことにより，発塵粒子を素早く測定器に導入した。また，発塵粒子濃度を高くするため，A4用紙1枚全面をベタ印刷した。パソコンから印刷の命令を出した時を測定開始とし，1分ごとの粒子の個数濃度を測定した。発塵量Pは次式のように，この個数濃度に送風量を乗じた量とした。

$$P=(C-C_{BG})\times Q \qquad (2\text{-}0)$$

測定は，CNCで計数される値がほぼ0になるまで行った。

次に，印刷を行うプリンタの種類ごとの発塵個数を比較するために総発塵量を求めた。総発塵量は，前述の発塵粒子の個数の時間変化の測定値を合計し，紙一枚あたりの値として算出した。

次に，発塵粒子の粒径分布測定では，SMPSで測定可能な濃度（1000個/cc以上）にするために内部クリーンブースの送風を停止した状態で複数枚の印刷を行い，全ての印刷終了後，SMPSに0.3L/minで導入し，ダウンスキャン120秒，アップスキャン30秒で測定を行った。

2-3 発塵粒子の形状観察および組成分析の方法

発塵粒子の形状観察と組成分析では，シリコンウエハ上に捕集した粒子を用いた。分析用のサンプル作成は，縮流部から発塵粒子を流量60L/minで一段インパクタ（50%カットオフ径0.3μm）に導入し，衝突板上に設置したシリコンウエハ上に粒子を捕集する方法で行った。作成したサンプルをSEM（Scanning Electron Microscope：日立製作所；S4500型）により形状を観察し，撮影した。また，エネルギー分散型X線分析装置EDX（Energy Dispersive X-ray Spectrometer：堀場製作所EMAX-5570W）により粒子中の含有元素の定性分析をおこなった。同様に，予備実験として，トナーカートリッジより直接取り出したトナーについても同様に形状観察および分析を行った。

SEMで試料を撮影する場合には，試料表面に電子線（電子プローブ）を照射し，反射する2次電子を検出することで画像を結んでいる。試料表面に電子線を照射した際には，この2次電子と共に原子特有のエネルギーを持つX線も発生している。EDXでは，このX線を液体窒素により冷却したSi半導体検出器により検知し，試料の元素分析を行う。測定できる元素は（^{5}B～^{92}U）である[13]。

2-4 試験体各部位の発塵量

印刷を行った際に，プリンタのどの部位からの発塵量が多いのかを調べるために，各部位での発塵量の測定を行った。測定は，内部クリーンブースを停止した状態で，プリンタ本体の開口部から約 2cm 離れた位置にサンプリングノズルを設置し，そこからサンプリングした粒子を TSI 社製の CNC に 0.3L/min で導入し，測定を行った。測定時間は印刷開始から 5 分間とした。

2-5 帯電量分布

2-5-1 帯電量分布の測定原理[14)]

粒子の帯電量分布を調べる方法として，平行平板電極を用いて粒子透過率を測定し，その透過率から帯電量分布を算出した。ここでは，透過率から帯電量分布を算出する方法ついて述べる。

Fig.2-3 に示すように，長さ L，電極間距離 $2h$ の平行平板電極間を層流で，帯電粒子が運ばれる場合を考える。電界強度 E の電界中に速度 $\bar{u}$ で流入する帯電量の x，y 方向の速度 v_x，v_y は次式で表される。

$$V_x = \frac{dx}{dt} = \frac{3}{2}\bar{u}\left\{1-\left(\frac{y}{h}\right)^2\right\} \tag{2-1}$$

$$V_y = \frac{dy}{dt} = \pm Z_p E \tag{2-2}$$

Eq.2-2 中の粒子の電気移動度 Z_p は，単位強さの電場内における粒子の移動度を表し，粒径 d_p，帯電数 n_p を用いて次式で表される。

$$Z_p = \frac{n_p e C_c}{3\pi\mu d_p} \tag{2-3}$$

ここで，C_c は Cunningham の補正係数，e は電気素量，μ は流体の粘度である。

Eqs.2-1,2 から得られる微分方程式(dy/dx)を，x=0 の時の流入位置を y=H として，(x,y)=(0,H)から(L,-h)まで積分し，

$$L=\frac{3\bar{u}}{2Z_pE}\left\{H\pm\frac{h}{3}\left(\frac{H}{h}\right)^3+\frac{2}{3}h\right\} \tag{2-4}$$

粒子除去率 R は，Eq.2-4 を代入して次式のように表される。

$$R=\frac{\int_{\pm h}^{H}V_x(y)dy}{\int_{\pm h}^{h}V_x(y)dy}=\frac{H\pm\frac{h}{3}\left(\frac{H}{h}\right)^3+\frac{2}{3}h}{\frac{4}{3}h}=\frac{Z_pL}{2h\bar{u}}E \tag{2-5}$$

したがって，透過率 P は次式となる。

$$P=1\pm\frac{Z_pL}{2h\bar{u}}E \tag{2-6}$$

次に，粒径 d_p の粒子において，帯電数 n_p に分布がある場合を考える。帯電数 n_p の粒子の割合を $f(n_p)$ とすると，帯電粒子の透過率 P は，以下の式で表される。

$$P=f(0)+\sum_{|n_p|=1}^{\infty}f(n_p)\left(1\pm\frac{Z_pL}{2h\bar{u}}E\right) \tag{2-7}$$

ここで，ある電界強度 E で透過率 $P=0$ となるような帯電数を k とすると，帯電数 $|n_p|>|k|$ の粒子は全て電極板上に捕集されるため，Eq.2-7 は以下のようになる。

$$P=f(0)+\sum_{|n_p|=1}^{|k|}f(n_p)\left(1\pm\frac{Z_pL}{2h\bar{u}}E\right) \tag{2-8}$$

また，電界強度 $E=E(|k|)$ での透過率 P の変化率は，Eq.2-8 の透過率 P を電界強度 E で微分して，

$$\left.\frac{dP}{dE}\right|_{E=E(|k|)}=\pm\sum_{|n_p|=1}^{|k|}f(n_p)\left(\frac{Z_pL}{2h\bar{u}}\right) \tag{2-9}$$

となり，Eq.2-9 を Eq.2-8 に代入して次式の関係が得られる。

$$P|_{E=E(|k|)}\pm E(|k|)\left.\frac{dP}{dE}\right|_{E=E(|k|)}=f(0)+\sum_{|n_p|=1}^{|k|}f(n_p) \tag{2-10}$$

Eq.2-10 は，傾き $\left.\frac{dP}{dE}\right|_{E=E(|k|)}$，切片 $f(0)+\sum_{|n_p|=1}^{|k|}f(n_p)$ の直線の式であり，透過率曲線上の点 $(E(|k|),P|_{E=E(|k|)})$ における接線で表される。この

直線と透過率曲線の関係をFig.2-4に示す。ここで，kは透過率P=0となる帯電数であり，この時の電界強度$E(|k|)$はEq.2-6より，次式のように得ることができる。

$$E(|k|)=\frac{6\pi\bar{u}\mu d_p h}{|k|eC_c L} \tag{2-11}$$

算出の手順は，Eq.2-11より$E(|k|)$を求め，この時の透過率$P|_{E=E(|k|)}$を透過率曲線から得る。そして，透過率曲線上の点$(E(|k|),P|_{E=E(|k|)})$における接線を引き，切片から$|k|$個以下に帯電した粒子の割合$f(0)+\sum_{|n_p|=1}^{|k|} f(n_p)$を得る。同様にして，$|k|$-$1$個以下に帯電した粒子の割合$f(0)+\sum_{|n_p|=1}^{|k|-1} f(n_p)$を求め，これら二つの切片の差から，$|k|$個に帯電した粒子の割合$f(k)$を求めることができる。

しかし，実際には図微分で接線を引く際の誤差が大きいため，透過率曲線を関数で近似し，この関数の微係数を求めて帯電量分布を算出した。なお，関数を近似する際に，透過率曲線の特徴から以下の条件を満たす関数を用いた。

(1) 電界強度に対して単調減少である。

$$\frac{dP}{dE}\leq 0$$

$$\frac{d^2P}{dE^2}\geq 0 \tag{2-12}$$

(2) 電界が形成されないとき粒子は捕集されないとする。

$$P=1 \qquad at\ E=0 \tag{2-13}$$

(3) 無帯電粒子が存在する。

$$P=const.(=f(0)) \qquad at\ E\rightarrow\infty \tag{2-14}$$

これらの条件を満たす関数として，本研究では以下に表される関

数により透過率を近似した。

$$P = k \cdot \exp(\pm A \cdot E) + l \cdot \exp(\pm B \cdot E) \pm (l + k) + 1 \qquad (2\text{-}15)$$

ここで，A，B，k，l，は定数であり，測定した透過率曲線を表す最適値を最小二乗法により決定した。

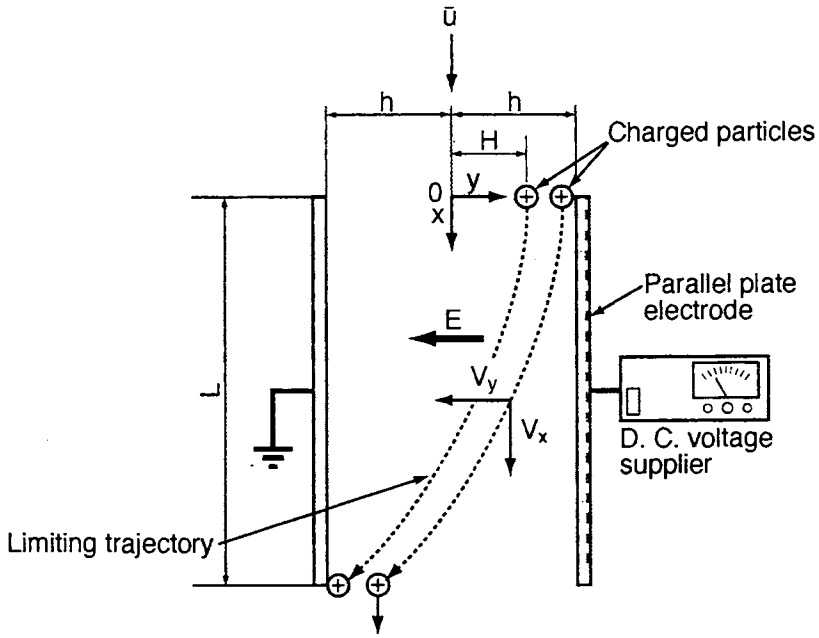


Fig.2-3 Trajectory of charged particles in an electric field between parallel electrodes.

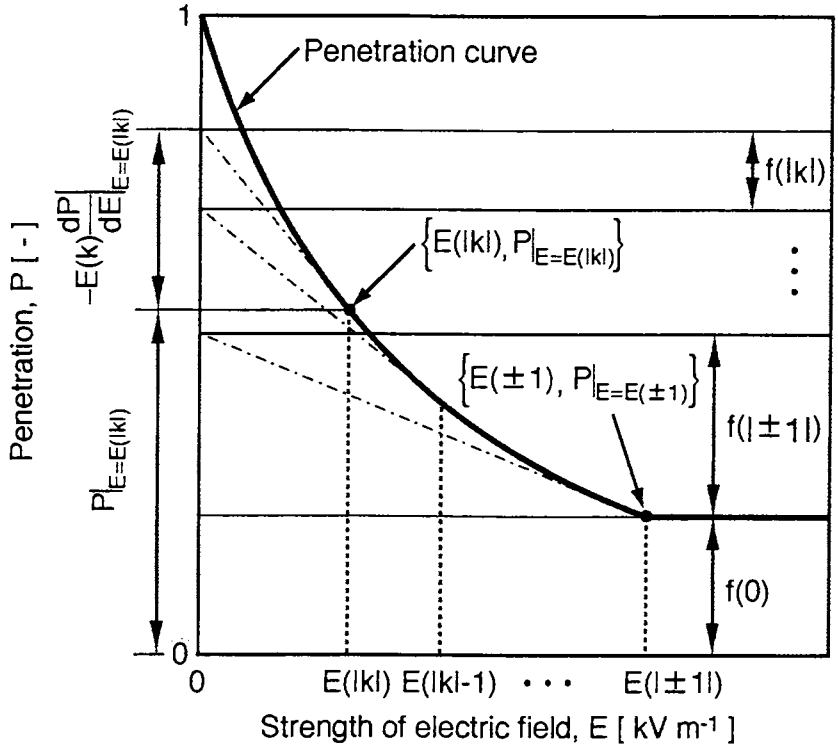


Fig.2-4 Calculation method of the charged distribution.

2-5-2 透過率の測定

上記の方法で帯電量分布を算出するためには，電界強度ごとの粒子透過率を測定する必要がある。ここでは，電界強度ごとの粒子透過率の測定方法について説明する。

電界強度ごとの粒子透過率の測定に用いた平行平板電極装置をFig.2-5 に示す。測定は，内部クリーンブースの送風を停止した状態で A4 用紙をベタ印刷し，発塵粒子を内部クリーンブース下部の縮流部より２つに分岐し， OPC （ Optical particle counter :RION 社 Model KC-01B ）に 0.5L/min で， CNC （ TSI 社 Model 3022A ）に 0.3L/min で導入した。そのため，平行平板電極装置内の流量 0.8L/min となる。電界は，直流電源装置（金沢コントロール機器：HV-1201 ）を用い，平行平板電極装置の電極間に電圧を印加して形成した。そして，透過率は電圧印加時の出口濃度を電圧を印加しない時の濃度で除することにより求めた。

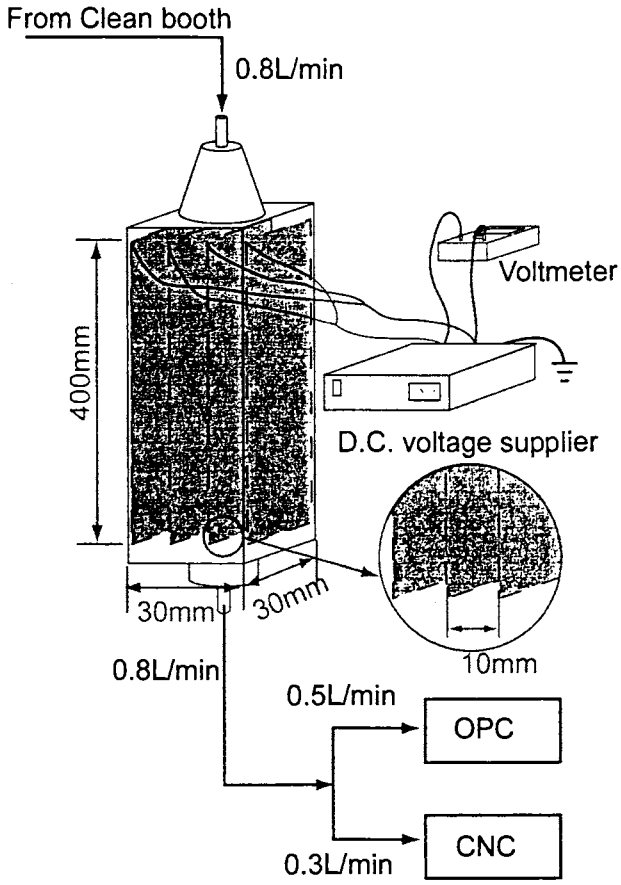


Fig.2-5 Detail of parallel plate electrode.

黒野[11]は，同タイプの装置を用いて，^{241}Am によって平衡帯電状態にした単分散 PSL（Polystyrene Latex）粒子の帯電量分布を測定し，Boltzmann の帯電量分布と比較している。その結果，この平行平板電極を用いた測定装置により透過率を測定し，帯電量分布を算出することができることを報告している。Fig.2-6 に平行平板電極装置内の流量が 0.8L/min（流速 1.48×10^{-2}m/s）の場合，1 個帯電の粒子が全て平行平板で捕集されるのに必要な最小の印加電圧を前節の方法により算出したものを示す。なお，内部クリーンブースの送風を止めた状態のクリーンブース内の発塵粒子の個数濃度は，Fig.2-7 に示すように単調に減少する。しかし，Fig.2-8 に示すように，粒径分布に関しては印刷直後 5 分後のデータを除いて時間が経過してもほぼ変化しない。このことを利用して，透過率の測定手順を以下のようにした（Fig.2-9）。まず，平

板電極に電圧を印加しない状態で CNC と OPC を用いて同時に1分間測定を行い，個数濃度が単調減少するようになるまで測定し，その時の値を電圧未印加時の粒子個数濃度 C_0 とした。次に，ある電圧 V を印加し，粒子個数濃度 C_V を1分間，4回測定した。その後，再び電圧を印加しない状態で1分間，4回測定した。この一連の動作を同じ電圧で数回繰り返した。そして，電圧印加時の C_0 を推定するために，前後の C_0 を用いた。このようにして得られた C_V と C_0 の比を計算することによって，透過率を算出した。以上の操作を電圧を変えて行うことで，各粒径範囲における透過率曲線を得た。その透過率曲線を最小二乗法によって前述の Eq.2-15 で近似し，その透過率曲線の式から帯電量分布を算出した。粒径範囲については，0.3μm 以下の粒子（d_p=0.01～0.3μm）については，CNC により測定した粒子個数と OPC で測定した 0.3μm 以上の粒子個数の差により求めた。0.3μm 以上の粒子については OPC の測定範囲（0.3～0.5μm，0.5～1μm，1～2μm，2～5μm）に従った。

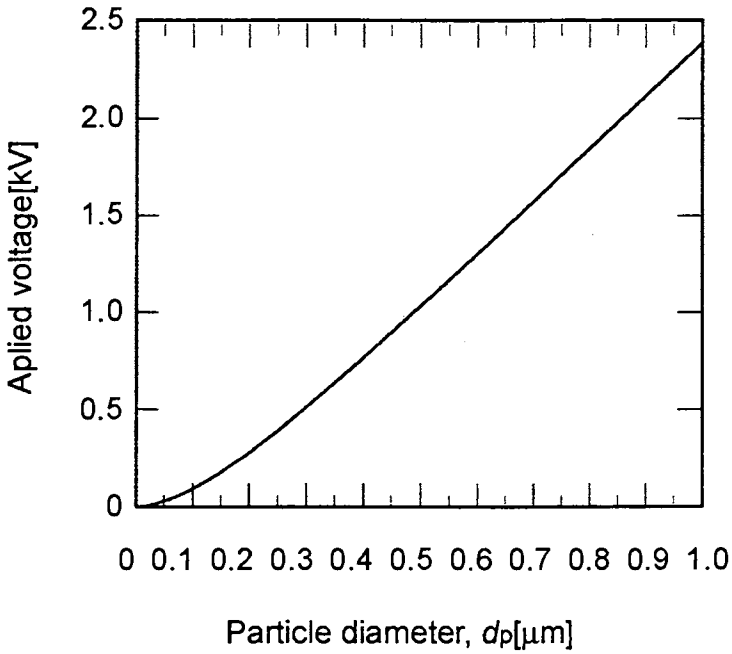


Fig.2-6 Minimum voltage necessary to collection of singly-charged particles between parallel electrodes.

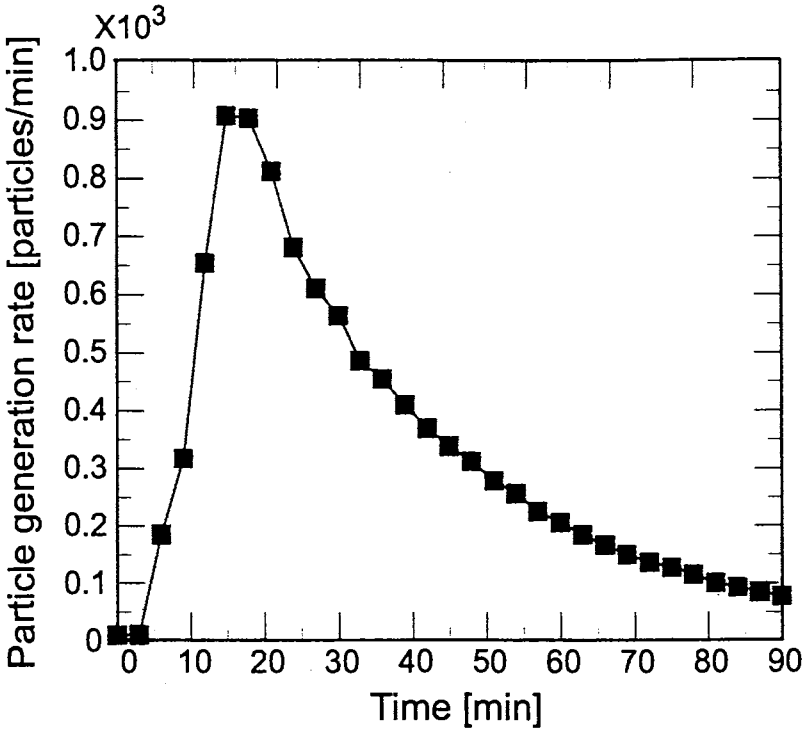


Fig.2-7 Change in particle generation rate from a laser printer measured by CNC.

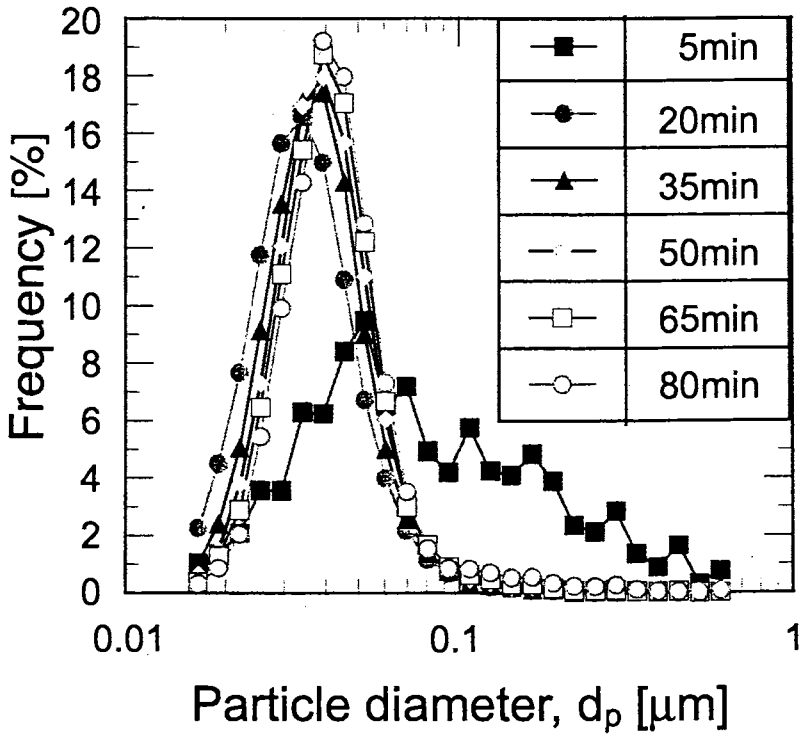


Fig.2-8 Change in size distribution of particles generated from a laser printer with time.

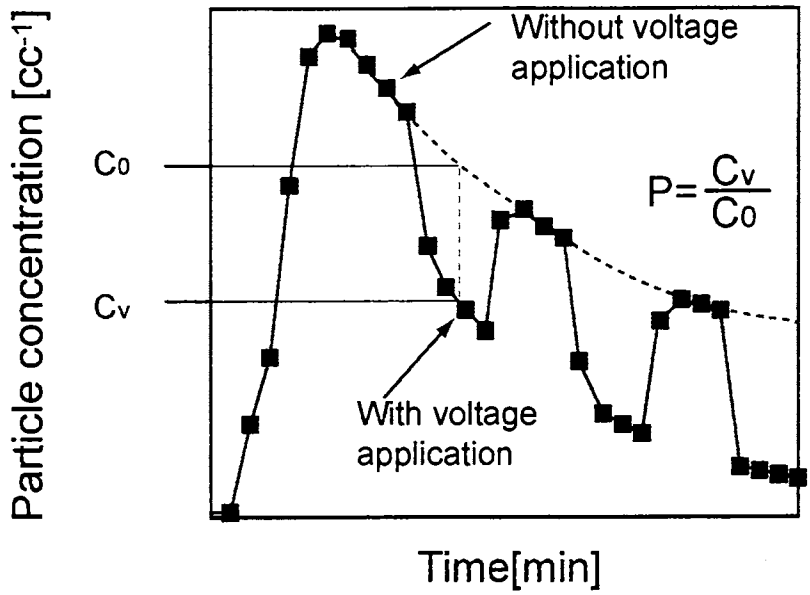


Fig.2-9 Procedure for measuring particle concentration with and without voltage application.

具体的な算出例を Fig.2-10 に示す。図は，OPC を用いて測定した粒径 0.3～0.5μm の範囲での粒子透過率である。最小二乗法によって Eq. 2-15 中の係数 A，E，k，l は，Table 2-1 に示すようになった。この透過率曲線の式を用い，粒径範囲の中央径を代表径として，先に述べた手法で帯電量分布を求めた。その結果が Fig.2-11 である。

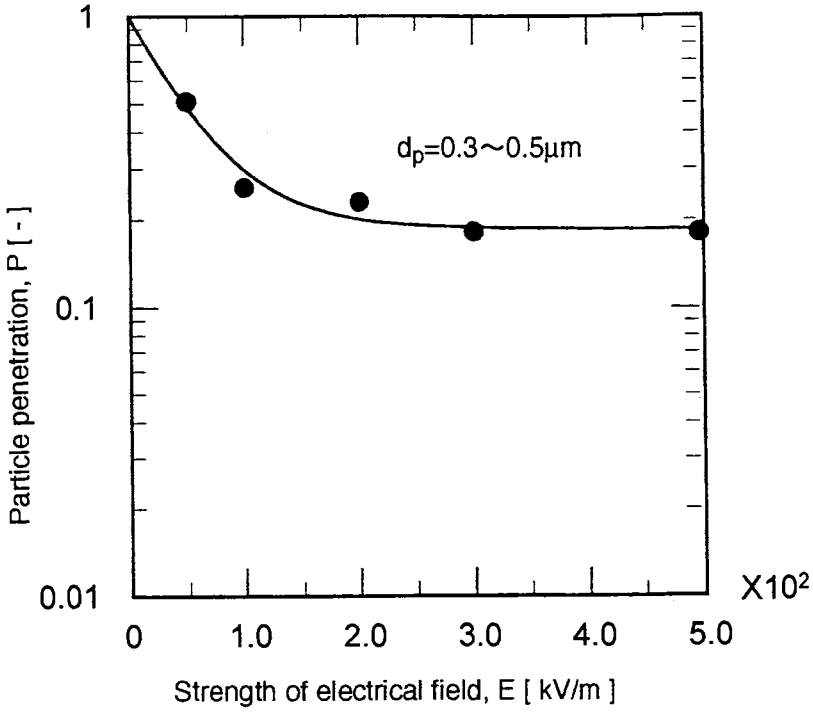


Fig.2-10 An example of penetration curve for particles emitted from an ink jet printer.

Table 2-1 Coefficients of equation for a penetration curve determined by least square method.

A	B	k	l
1.987	1.987	0.5980	0.2166

Equation for penetration curve;

$$P = k \cdot exp(-A \cdot E) + l \cdot exp(-B \cdot E) - (l + k) + 1$$

(Eq. 2-15)

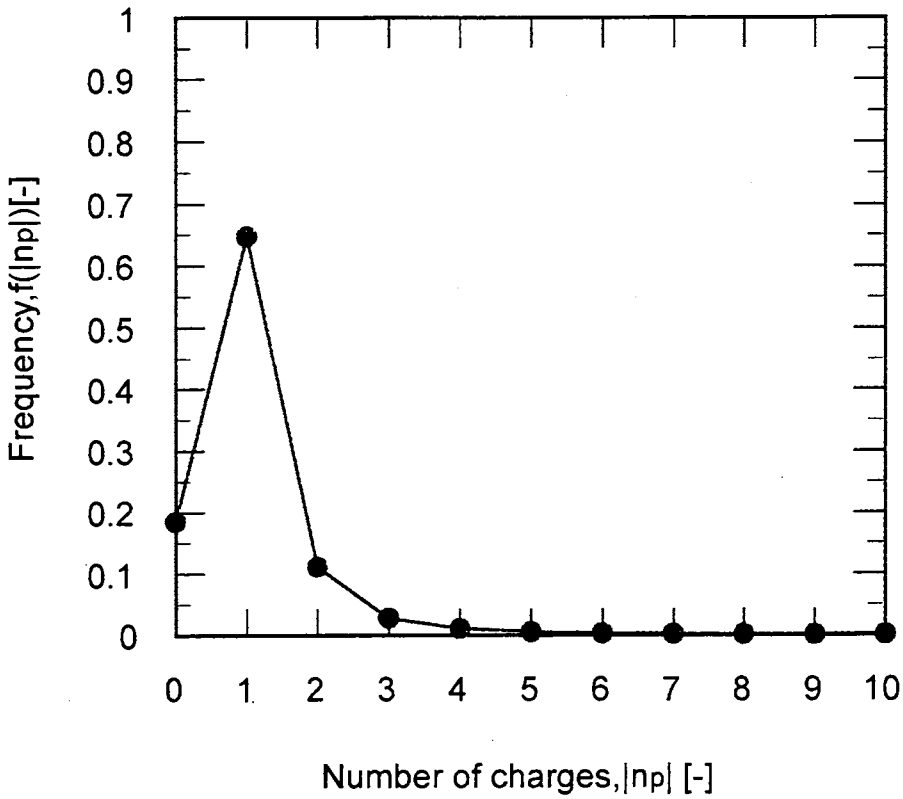


Fig.2-11 Charge distribution of particles emitted from an ink jet printer.

第３章　インクジェットプリンタからの発塵粒子の特性

本章では，前章で述べた測定法を用いたインクジェットプリンタからの発塵粒子の測定結果を示す。

3-1　実験装置および方法

試験体であるプリンタを Fig.2-1 に示した内側のクリーンブースの内側に設置した。プリンタは，染料インクを使用した TIJ 方式のカラーインクジェットプリンタ IP-1（2000 年製）である。

インクジェットプリンタの発塵源は，インク滴の飛散と予想されることから，予備実験として，IP-1 用の 4 色のインク，シアン（C），マゼンタ（M），イエロー（Y），ブラック（K）を 100℃で加熱し乾燥させ，残留する固形分の重量割合を測定した。その結果，固形分の割合はブラックインクが 13.4wt%，シアンインクが 9.8wt%，マゼンタインクが 10.8wt%，イエローインクが 9.8wt%であった。ブラックインク中の固形分の比率が比較的大きいが，その他の 3 色についてはほぼ同じであった。なお，IP-1 用のインクは全色とも染料インクである。

次に，発塵粒子を対象とした実験装置および方法について述べる。実験では，IP-1 を用いて CMYK 各 4 色それぞれ A4 用紙にベタ印刷（印刷面積 540cm^2）した際の発塵量の時間変化，総発塵量，粒径分布を測定した。次に，発塵量の多いと考えられる，ブラック（K）に関して，印刷面積を 1/4 にしたもの，A4 用紙全面に 12pt の A の文字を（3850 個，印刷面積 130cm^2）印刷したもの，給紙のみ（印刷を行わず紙だけプリンタを通過）について，一枚あたりの総発塵量を測定した。同様に，ブラックのベタ印刷を行った時の帯電量分布の測定を行った。さらに，4 色それぞれを印刷した場合の発塵粒子をインパクタで捕集し，SEM で形状観察し，EDX で含有元素を分析した。さらに，プリンタ各部位からの発塵量を測定した。測定する部位は，Photo 3-1 に示す給紙口，排紙口

の 2 箇所とした。IP-1 では，この 2 箇所のみに開口があり，ファンによる強制吸排気は行われていない。

3-2 実験結果および考察

各 4 色で A4 用紙をベタ印刷した場合の発塵量の時間変化を Fig.3-1 に，総発塵量を Fig.3-2 に示す。図より，ブラック印刷では印刷開始から約 2 分 30 秒後に，他の 3 色のカラーに関しては，約 6 分 30 秒後に最大値となっている。この最大値を示す時刻は，ほぼ印刷終了時刻に一致しており，印刷終了とともに粒子の発生が停止していることが分かる。IP-1 では，ブラックを 1 つのインクカートリッジで，その他の 3 色を 1 つのインクカートリッジで印刷を行う。そして，ノズルが各カートリッジ底面に同数の 180 個開いているため，すべてのノズルを使用できるブラックを印刷する際には，他のカラー 3 色（ノズルそれぞれ 60 個ずつ使用）に比べ約 1/3 の時間（約 2 分）で終了する。一方，総発塵量でも，ブラックで印刷した場合の発塵量が，他の色で印刷した場合に比べ大きかった。これは，同じ印刷面積であってもブラック印刷の方がインク滴の射出される圧力が高いために，それに伴ってミストの飛散量も多くなったと考えられる。

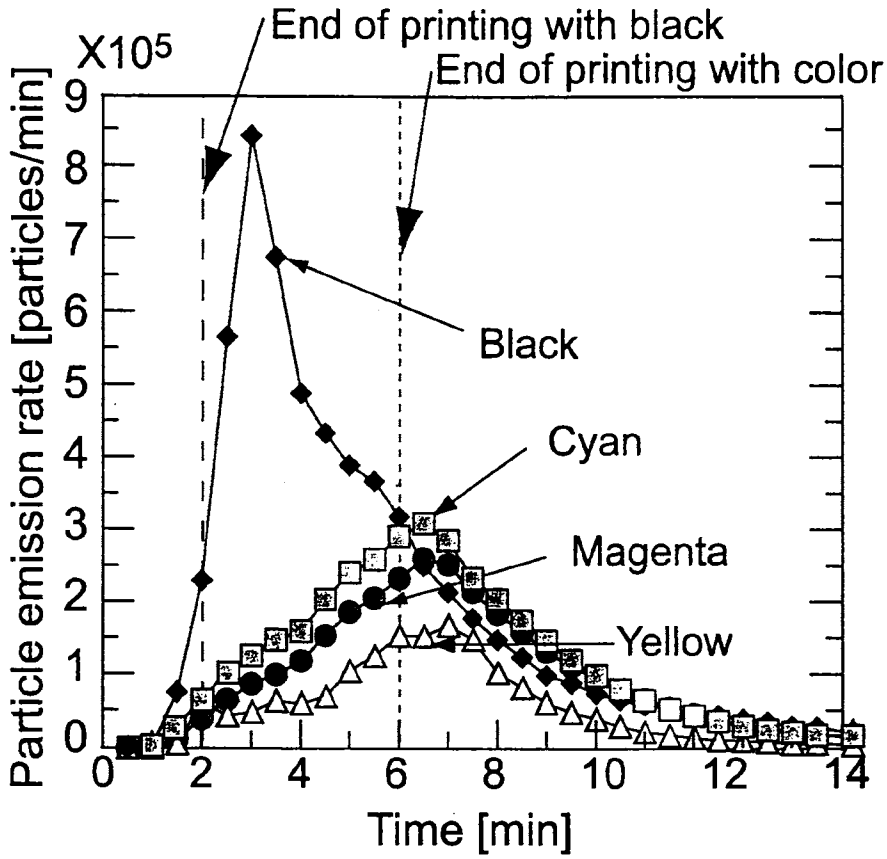


Fig.3-1 Change in particle emission rate from an ink jet printer

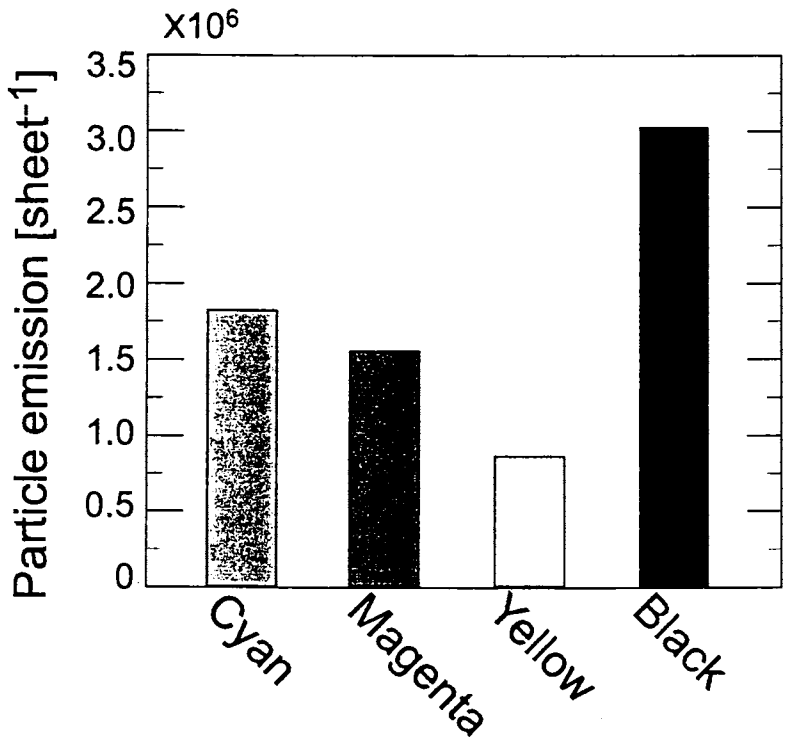
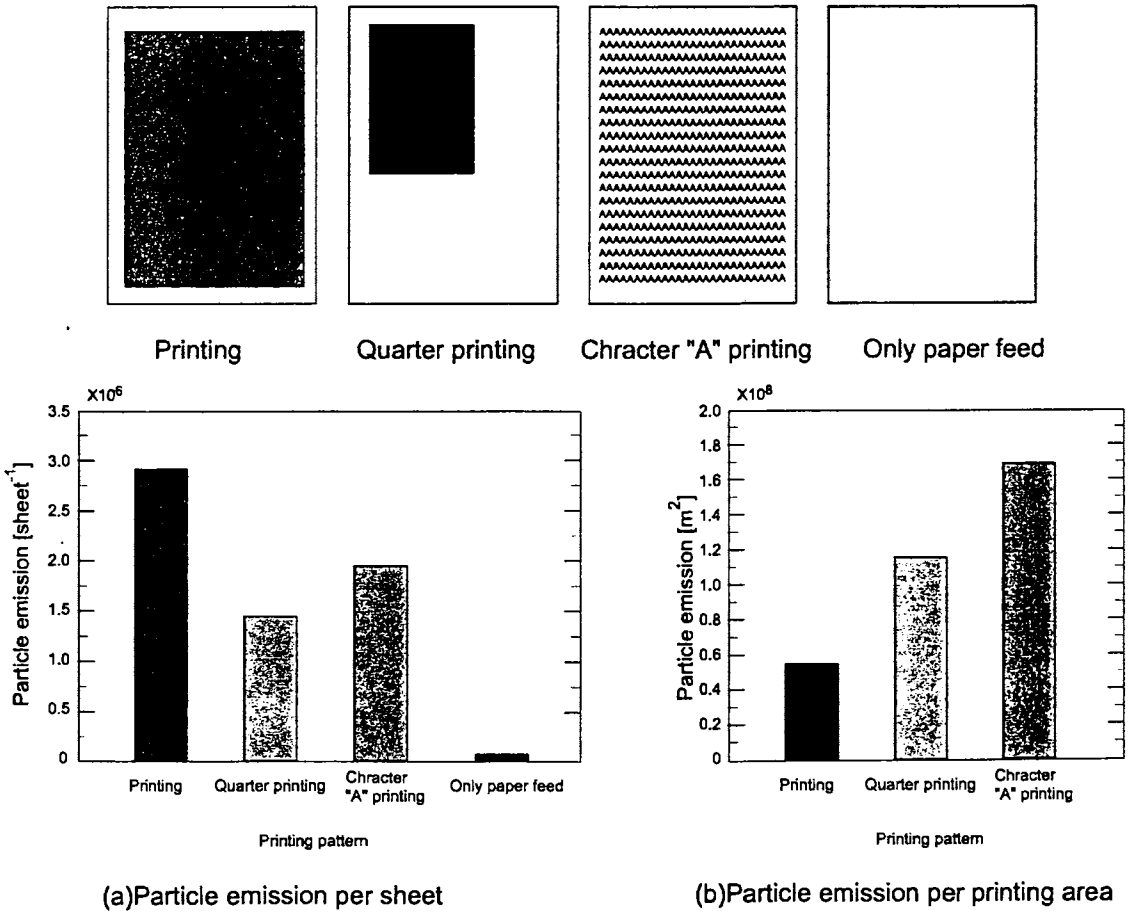


Fig.3-2 Comparison of particle emissions from an ink jet printer.

次に，印刷パターンを変えた場合の発塵量の結果を Fig.3-3 に示す。図は，一枚あたりの発塵量と印刷面積 $1m^2$ あたりの発塵量を示した。図より，ベタ印刷で面積を 1/4 にした場合では，発塵量は全面ベタ印刷に比べ少なくなっているが，単位印刷面積当たりの発塵量は増加している。これは，印刷を行った際の印刷面積あたりのヘッドの往復回数が多いためと考えられる。また，同じ面積を印刷した場合でもベタ印刷に比べて細かい文字を印刷する方が発塵量は増加する。これは，インクを吐出をする，しないの切り替えを頻繁に行うことで，発塵量が増えたと考えられる。一方，給紙のみの場合は，ほとんど発塵しなかった。このことより，発塵の主原因がインクの吐出に由来していると言える。



(a)Particle emission per sheet　　(b)Particle emission per printing area

Fig.3-3 Comparison of particle emissions from an ink jet printer with different printing patterns.

次に，各4色でA4用紙をベタ印刷した場合の粒径分布の測定結果をFig.3-4に示す。図より，ブラック印刷時の幾何平均径が0.065μmと他の色に比べて大きく，イエロー印刷時が0.026μm，マゼンタ印刷時が0.023μmとなった。しかし，シアンについては，平均径0.018μmとなったが，SMPSの測定下限0.016μm以下にピークがあると考えられるため実際の平均径についてはわからなかった。このように，色ごとに発塵粒子の粒径分布に差が出たのはインクの物性に由来すると考えられる。また，予備実験で測定したインクの乾燥重量から，発塵粒子が完全に乾燥したと仮定した場合の乾燥前のインク液滴径を推算した。その結果，シアン：粒径0.18μm（3.12×10^{-5}pL），マゼンタ：粒径0.22μm（6.00×10^{-5}pL），イエロー：粒径0.28μm（1.17×10^{-4}pL），ブラック：粒径0.59μm（1.07×10^{-4}pL）となり，主インク滴の大きさ15μm（4pL）よりもかなり小さくなっている。このことより，サテライトが発塵の原因と考えられる。

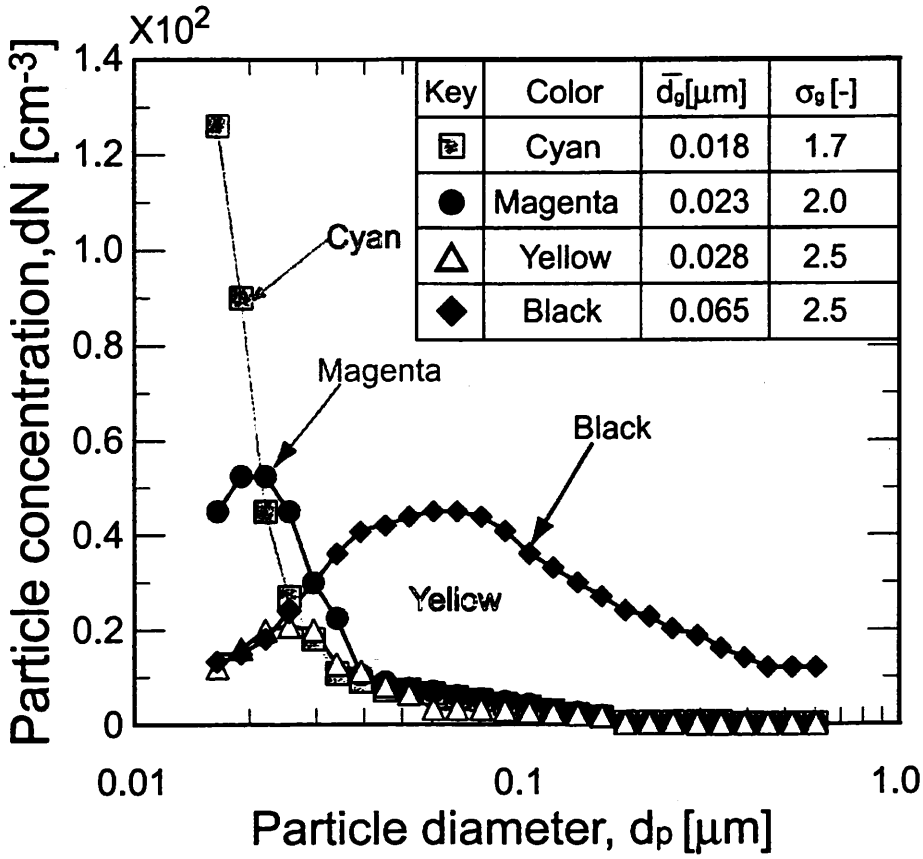


Fig.3-4 Size distribution of particles emitted from an ink jet printer.

次に，発塵粒子の帯電量分布の測定結果を Fig.3-5 に示す。図より，粒子が明らかに帯電していることが分かる。これは，インク滴吐出してミストが解裂する際に帯電したと考えられる。各粒径範囲の平均帯電数 $\overline{|n_p|}$ は，平衡帯電状態にあるとした場合の平均帯電数（粒径 0.065μm で $\overline{|n_p|}$=0.41，粒径 0.4μm で $\overline{|n_p|}$=1.50，粒径 0.75μm で $\overline{|n_p|}$=2.05）に比べてわずかながら低くなった。しかし，粒径の大きい粒子では，8 割以上の粒子が帯電していることから，静電気力による粒子除去の可能性が示された。

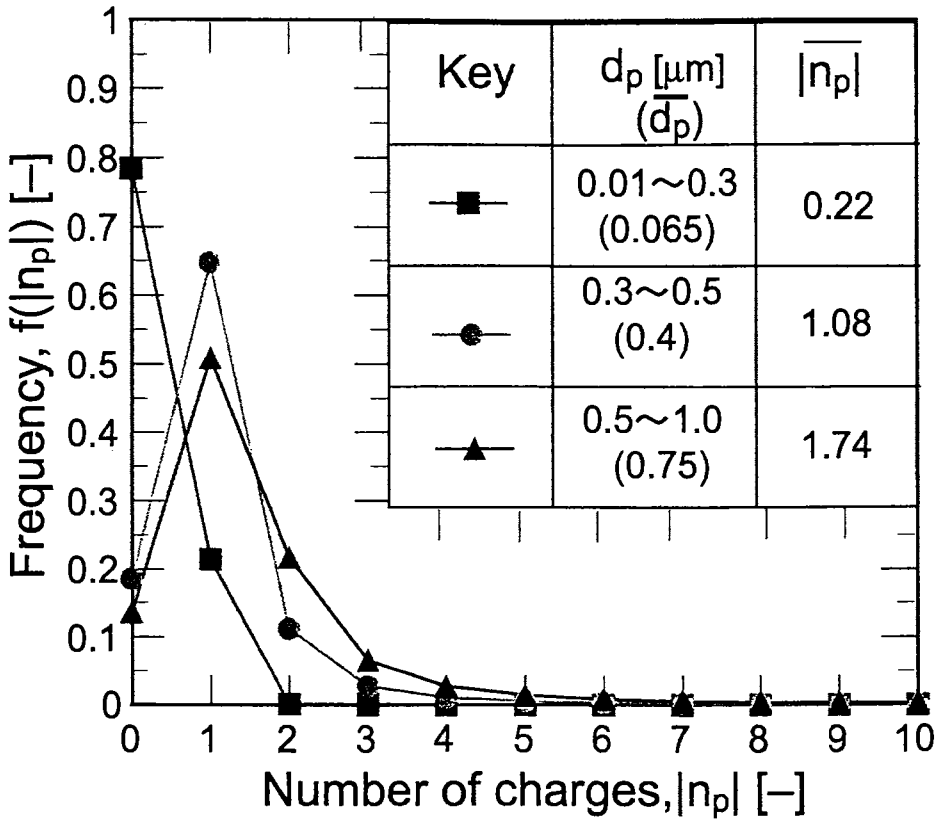


Fig.3-5 Charge distribution of particles emitted from an ink jet printer.

次に，インパクタにより捕集した発塵粒子の SEM 写真と EDX による元素分析の結果を Fig.3-6 に示す。捕集された粒子の形状は，どの色を印刷した場合の発塵粒子も球形であった。次に，含有元素に関しては，炭素，酸素が全ての色で検出されている。また，シアン印刷では，鉄，カルシウム，クロム，ホウ素が，マゼンタ印刷では，鉄，クロムがそれぞれ検出されたが，これは，インク中に色材として含まれる染料に由来すると考えられる。しかし，粒径 0.3μm 未満の粒子はインパクタでは捕集できないため，発塵粒子の大半を占める粒径 0.1μm 未満の粒子の組成については不明である。しかし，インクジェットプリンタの発塵粒子は，明らかにインク滴の飛散であると考えられるので，粒径 0.1μm 未満の粒子も Fig.3-6 で示される粒子と同様の組成を有していると予想される。

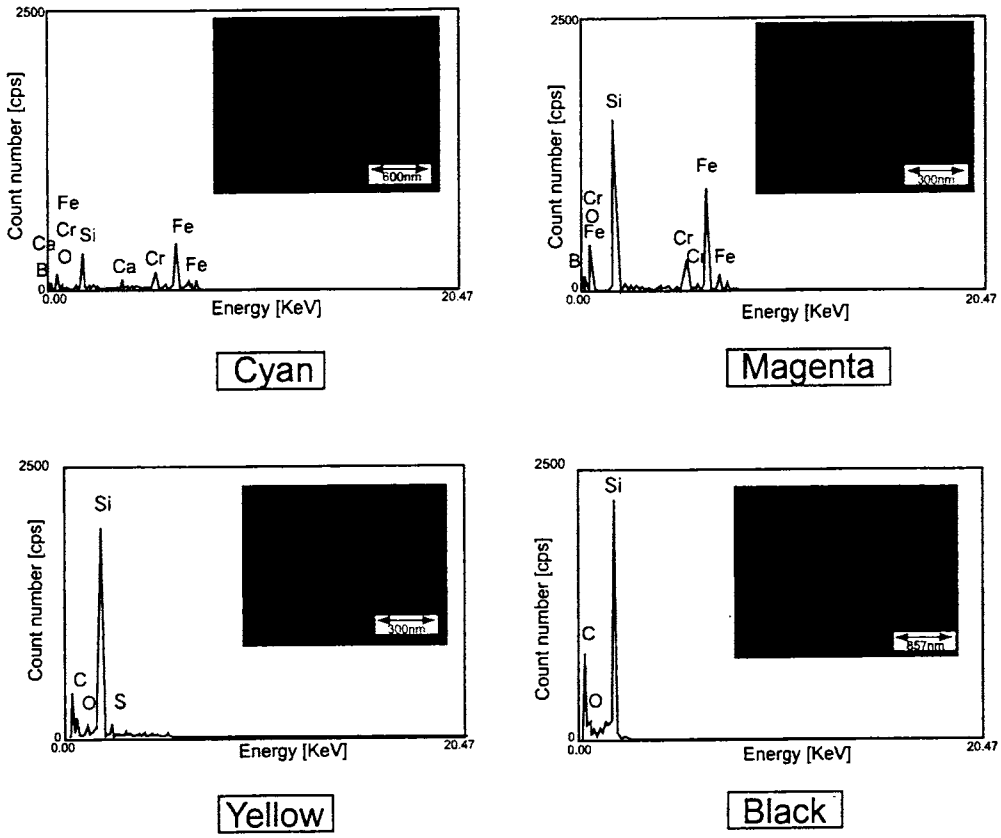


Fig.3-6 SEM graphs and elemental composition of particles emitted from an ink jet printer.

次に，給紙口と排紙口（Photo3-1 参照）での発塵量の測定結果を Fig.3-7 に示す。データは，印刷開始から 5 分間に各点でサンプリングされた総粒子個数である。図より，排紙口の発塵量が非常に多いことが分かる。これは，プリンタヘッドで発生した粒子が，紙が排紙される際に誘発される空気の流れにより放出されたためであると考えられる。

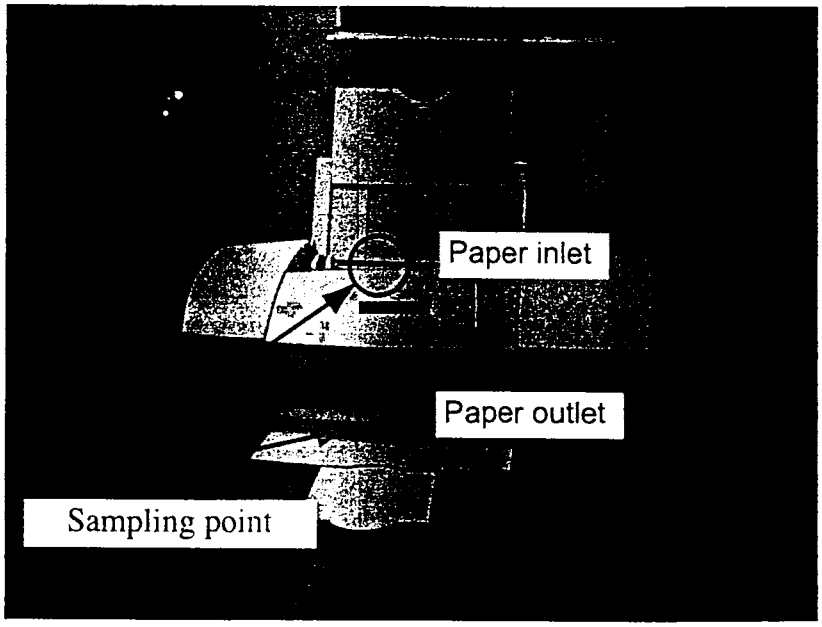


Photo 3-1 Sampling point of an ink jet printer.

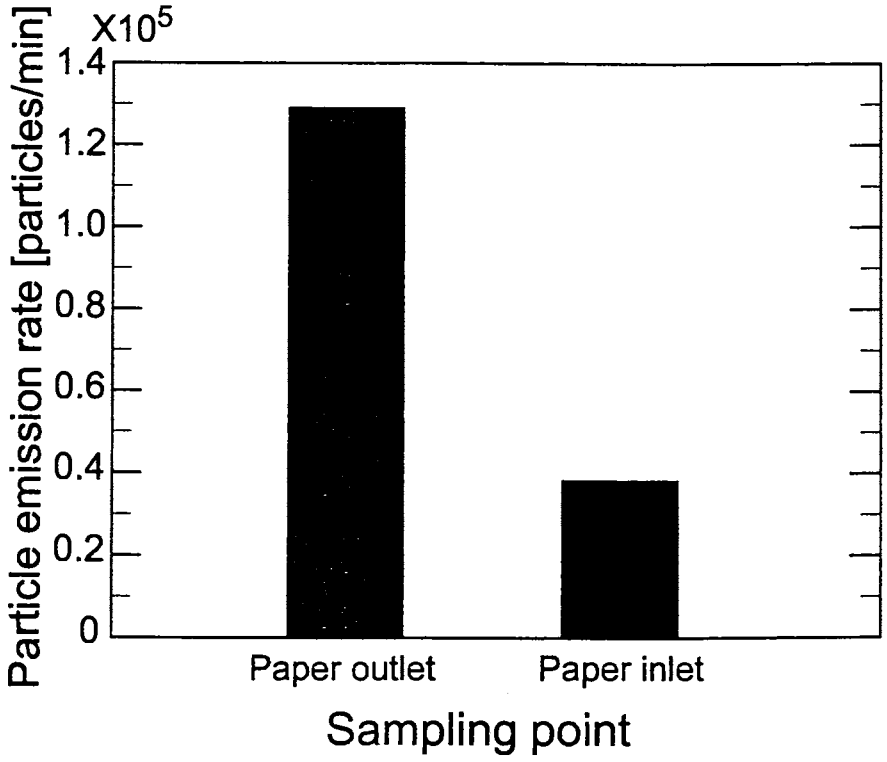


Fig.3-7 Comparison of particle emission rates from paper inlet and outlet of an ink jet printer.

第４章　モノクロレーザープリンタからの発塵粒子の特性

本章では，第２章で述べた測定法を用いたモノクロレーザープリンタからの発塵粒子に関する結果を示す。

4-1　実験方法

実験装置は，第２章で述べた装置を用いた。試験体として，モノクロレーザープリンタ LP-1（1999 年製，解像度 600dpi，印刷速度 8 枚/分），LP-2（1998 年製，解像度 600dpi，印刷速度 12 枚/分），LP-3（1999 年製，解像度 600dpi，印刷速度 6 枚/分）の３機種を用いた。まず，A4 用紙をベタ塗りした場合の総発塵量，粒径分布の測定，インパクタで捕集した発塵粒子の SEM による形状観察，EDX による含有元素分析は，３機種全てについて行った。その結果，総発塵量の最も多かった LP-1 に関して，帯電量分布，試験体各部位の発塵量を測定した。

また，予備実験として今回用いたトナーをカートリッジから取り出し，シリコンウエハ上に付着させて，SEM による形状観察および EDX による含有元素の分析を行った。その結果を Fig.4-1 に示す。トナー粒径は，3～5μm であることが確認できた。また，含有元素に関しては，カーボンブラックおよび樹脂バインダー由来の炭素，トナーに含まれる帯電制御剤の金属錯体由来の鉄が検出されている。ケイ素はシリコンウエハ基板由来である。

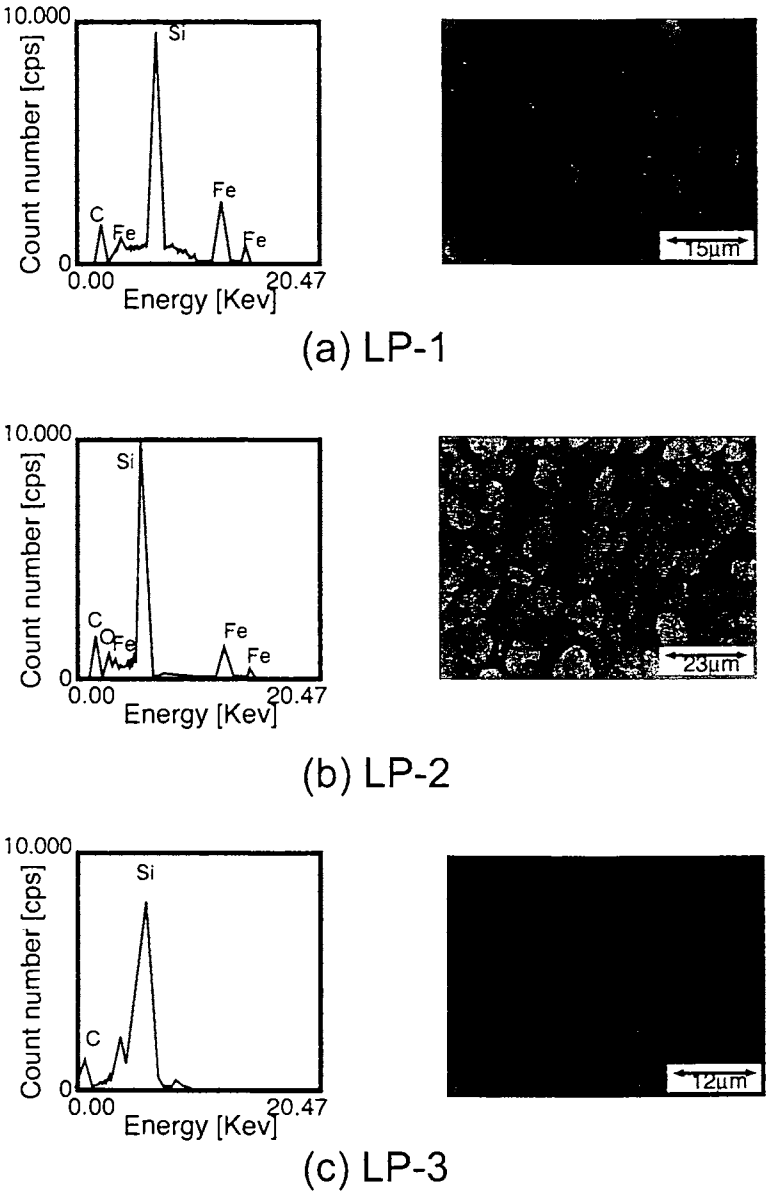


Fig.4-1 SEM graphs and elemental composition of toner powders.

4-2 実験結果および考察

まず，3機種のプリンタによるベタ印刷時と，LP-1について給紙のみの場合の紙1枚あたりの総発塵量をFig.4-2に示す。図より，LP-1の発塵量が特に多いことが分かる。また，いずれのプリンタでも粒径0.3μm以上の発塵量は非常に少ない。予備実験で観察したトナー粒子の粒径が3～5μmであるので，発塵粒子の多くはトナー粒子自身ではないと言える。また，給紙のみでも相当量の発塵があるので，紙自身に発生源があることが予想される。

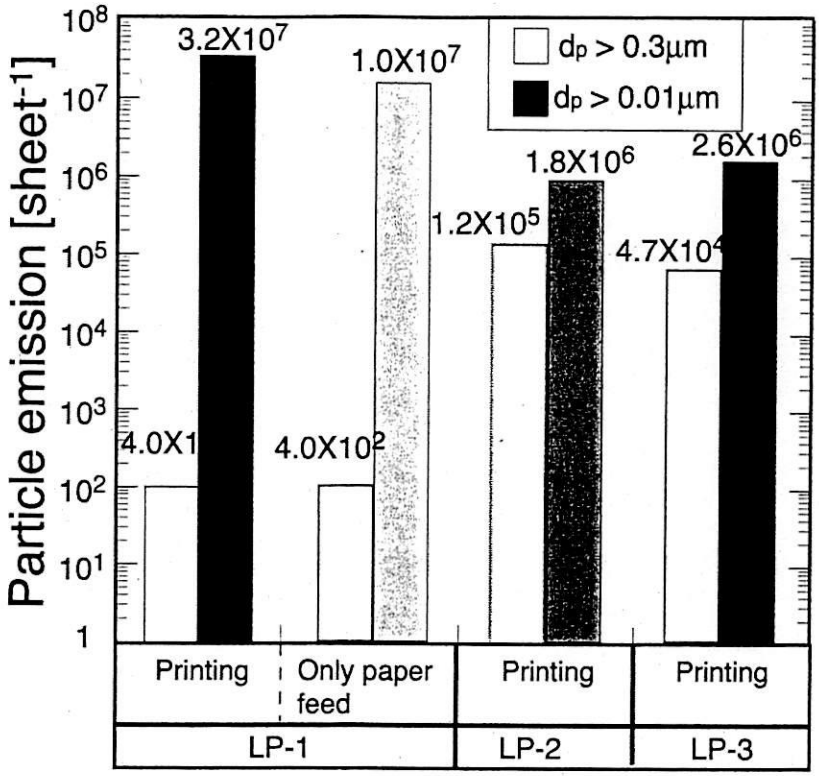


Fig.4-2 Comparison of particle emissions from a monochrome laser printer.

次に，3 機種の発塵粒子の粒径分布を Fig.4-3 に示す。また， LP-1 に関しては給紙のみの粒径分布も示す。LP-1 と LP-3 のベタ塗り時の粒径分布はほとんど一致しており，幾何平均径が 0.035μm 程度となった。一方， LP-2 は幾何平均径 0.062μm であり，他の 2 機種よりも大きくなった。このように，いずれのプリンタの発塵粒子も予備実験で観察したトナー粒子の粒径（ 3～6μm ）に比べて極めて小さいことが分かる。また，給紙時も LP-1 のベタ塗り印刷とほぼ同様の粒径分布であった。以上のように，印刷の有無により粒径分布は変化しないことが示された。

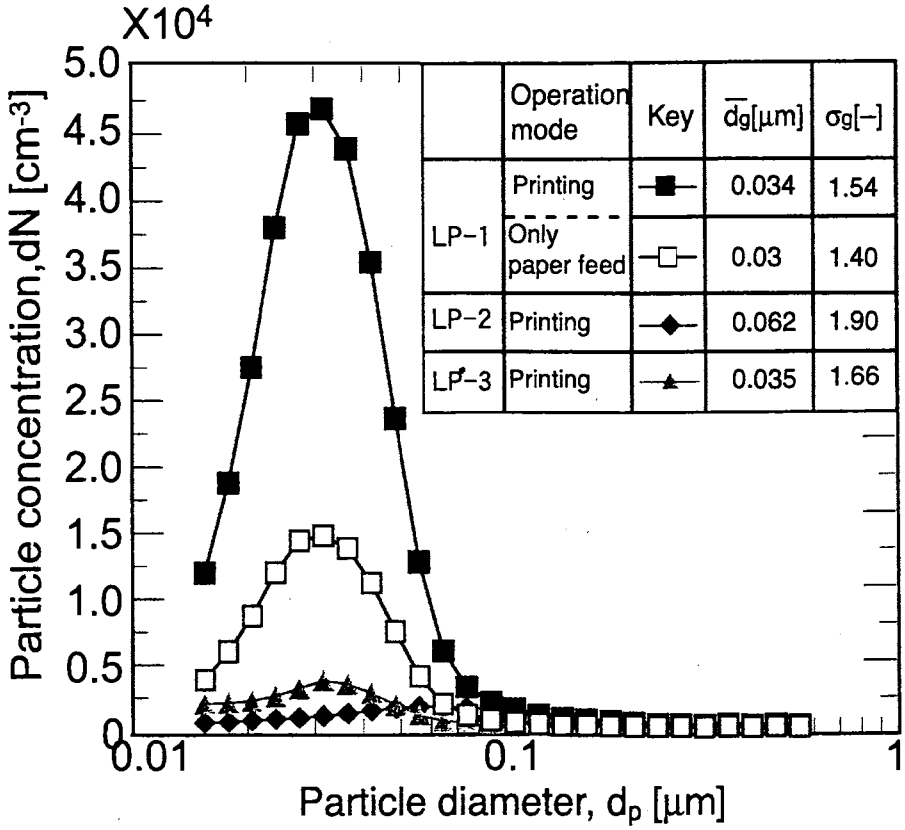


Fig.4-3 Size distribution of particles emitted from monochrome laser printers.

次に，インパクタで捕集した粒子の SEM 写真， EDX による元素分析の結果を Fig.4-4 に示す。捕集された粒子の形状および粒径は，ほぼトナーと類似しており，含有元素に関してもトナーの組成とほぼ一致している。これは，前章のインクジェットの場合でも述べたように， SEM で観察するためのサンプル試料を作成するためにインパクタを用いているため，カットオフ径（約 0.3μm）より小さい粒子についてはほとんど捕集されない。そのため，観察された粒子は発塵粒子に微量含まれているトナー粒子であり，発塵粒子の大半を占める粒径 0.1μm 未満の粒子はインパクタでは捕集されなかったと言える。

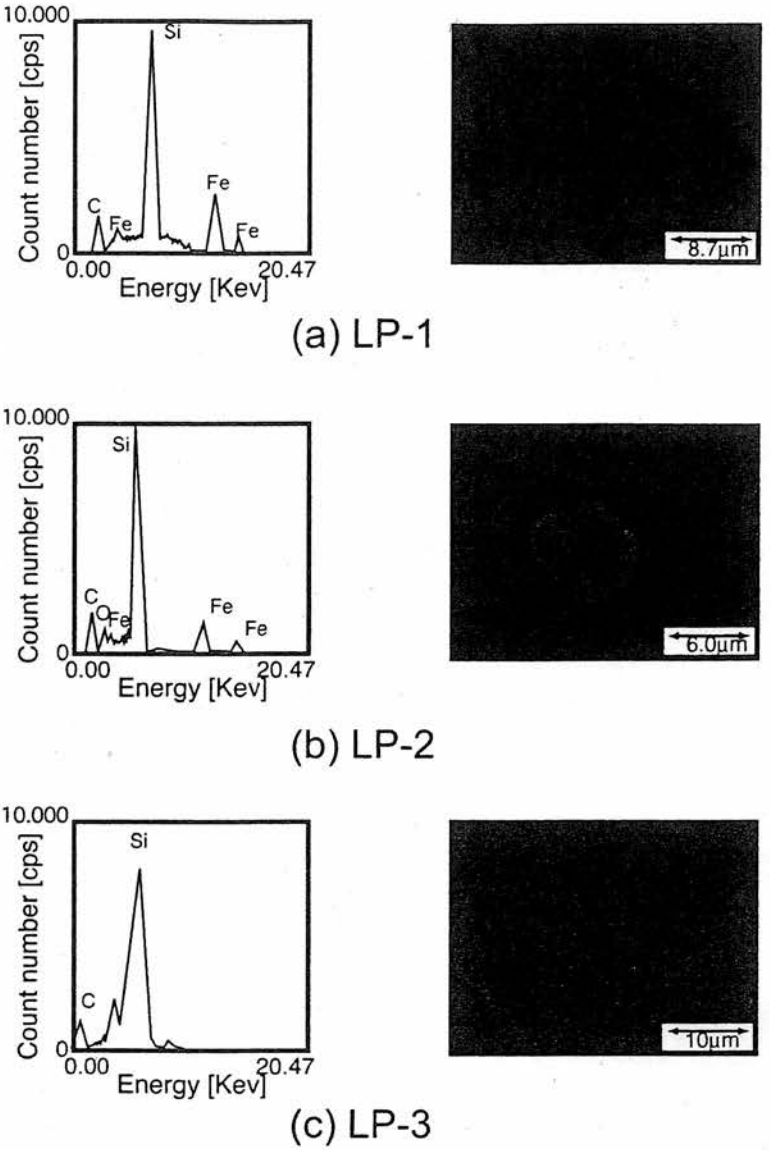


Fig.4-4 SEM graphs and elemental composition of particles emitted from monochrome laser printers.

次に，発塵量の多かった LP-1 について，試験体各部位での発塵量，粒子の帯電量分布の結果を示す。

まず，プリンタの発塵部位の同定を試みた。サンプリングは，Photo.4-1 に示すように給紙部，排紙部，右側排気部，左側排気部，背後排気部の 5 箇所で行った。なお，どの部位もプリンタ内部との空気の出入りはあるが，ファンによる強制的な吸排気は行われていない。サンプリング位置ごとに印刷開始から 5 分間の粒子の平均個数濃度を Fig.4-5 に示す。図より，排紙部からの発塵が特に

多く，その他は特に差が見られない。これは，定着ローラーの発熱により上昇流が生じ，排紙部中心に起こっているためと考えられる。

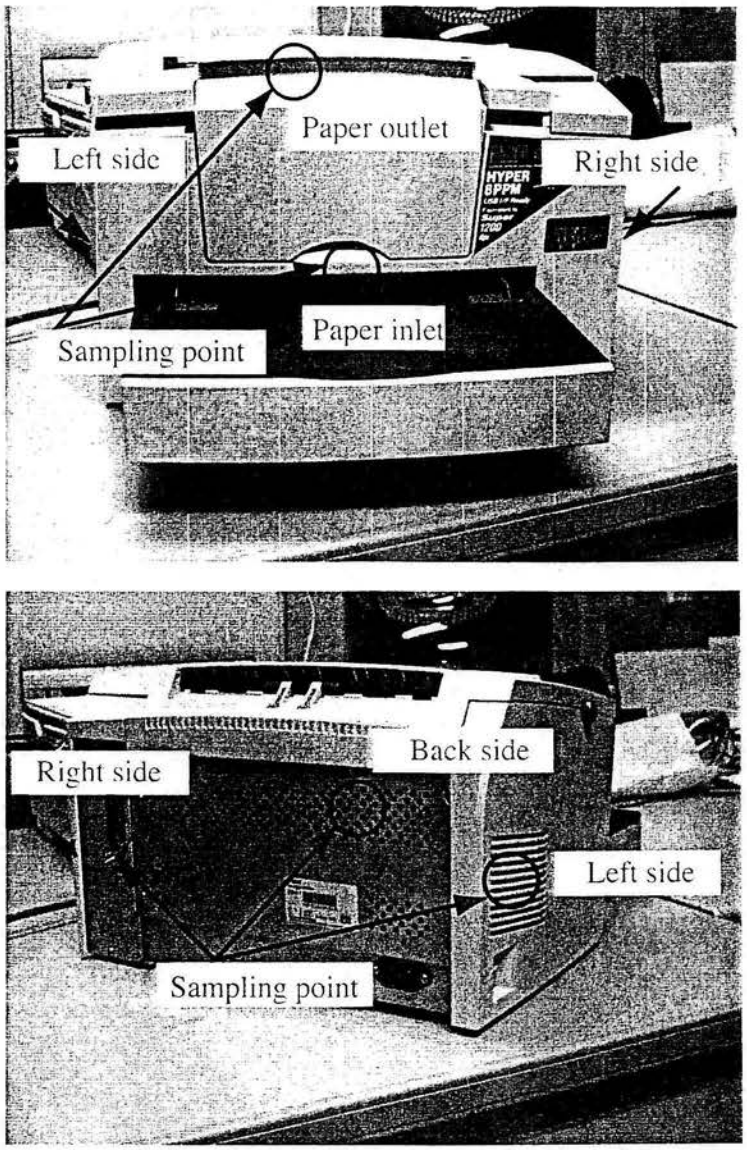


Photo 4-1 Sampling point of a monochrome laser printer.

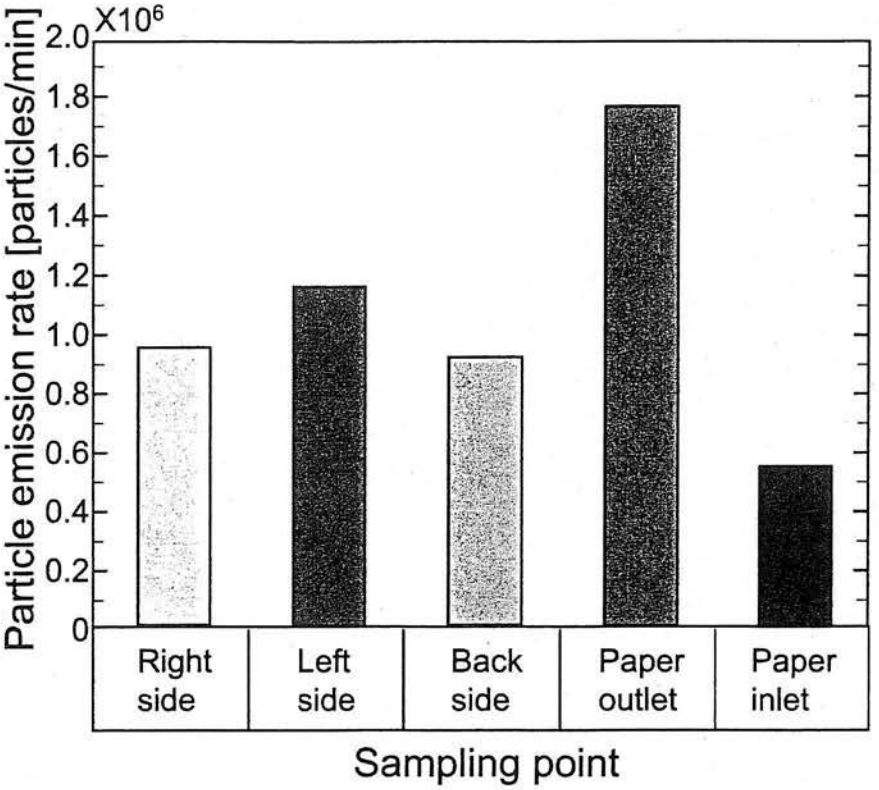


Fig.4-5 Comparison of particle emission rates among various sides of a monochrome laser printer.

次に，平行平板電極に電圧 3kV（粒径 1μm の 1 個帯電粒子を全て捕集することのできる最低電圧）を一定時間印加した場合と印加しなかった場合の出口濃度の時間変化を Fig.4-6 に示す。図より，電圧 3kV を印加した場合，電圧を印加しない場合と同様の傾向で粒子濃度が減少している。そこで，確認のために電圧を印加した場合としない場合の平行平板電極出口での粒径分布を SMPS により測定した結果を Fig.4-7 に示す。図より，電圧印加した場合としない場合で粒径分布にほとんど差が無いことが分かる。このことより，モノクロレーザープリンタから発生している粒子は，全く帯電していないことが分かる。通常，機械的な要因により発生した粒子は，少なからず電荷を有している。しかし，プリンタの発塵粒子は無帯電であることから，発塵メカニズムが機械的な要因によらないことがわかる。このように，プリンタからの 0.1μ

m 未満の粒子がトナーや機械部品の摩滅等で生じていないことが明らかになったので，他の有力な発塵源である紙に着目した。そこで，まず紙を 100℃で 24 時間加熱した前後の重量減少を調べた。その結果，普通紙の重量減少は， 0.17g/枚（ 4wt%）であった。また，プリンタの給紙時の重量減少は 0.07g/枚（ 1.7wt%）であった。一方，トナー粉末は乾燥前後で重量に変化がなかった。レーザープリンタでは，トナーを紙に定着させるために約 150～200℃の熱をかけながらローラーによる圧着を行っている。そのため，紙に含まれる水分が定着部の熱により蒸発する。その蒸発した水分が通常の室内温度まで急激に冷却された際に過飽和となり核生成が起こると考えられる。20℃で純粋な水蒸気は，過飽和度が 3.5 を越えると，均一核形成が起こる[9]。給紙時の紙の重量減少分（ 0.07g/枚）を全て水分の減少とし，プリンタ出口から熱対流により上昇する空気の速度を 5cm/sec と仮定して，給紙時間中のプリンタから発生する空気の体積を見積もり，その体積中の空気が常温まで急冷した場合の過飽和度を計算すると約 7 となった。この値は，均一核生成が起こるのに十分な過飽和度と言える。また，印刷の際のチャンバー内（ $0.5m^3$ ）の温湿度変化を測定した。印刷前は，温度 21.7℃，相対湿度 22.9%であり，印刷後は，温度 21.8℃，相対湿度 23.4%であった。この湿度変化分の水分重量を計算すると， 0.0043g となり，給紙時の紙の重量減少に比べ非常に小さくなっている。

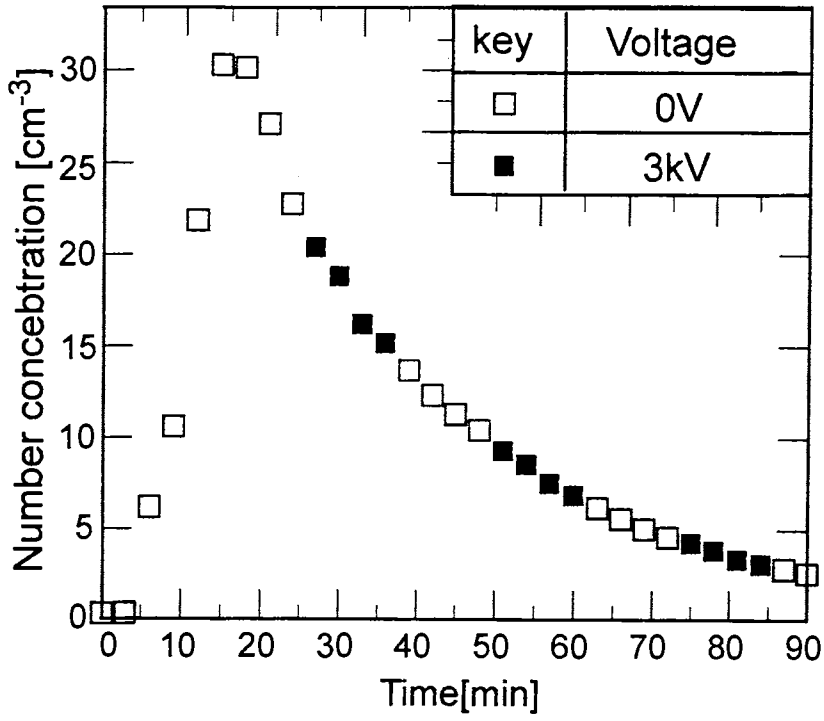


Fig.4-6 Change in outlet particle concentration with and without voltage application.

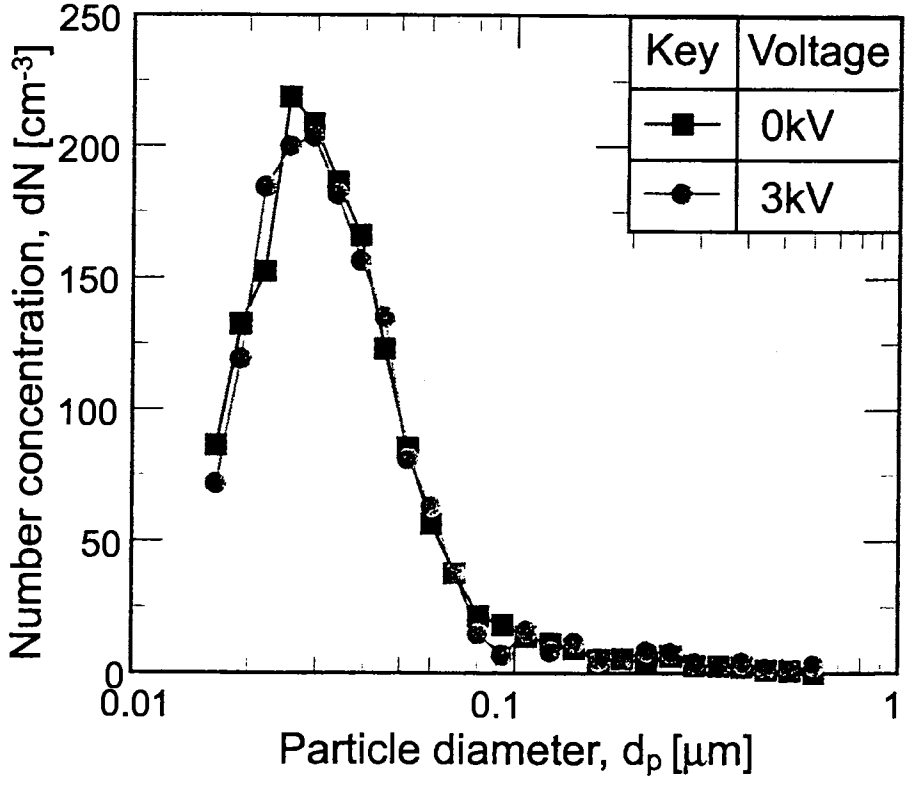


Fig.4-7 Particle size distribution at the outlet of parallel plate electrodes.

第５章　カラーレーザープリンタからの発塵粒子の特性

本章では，第 2 章で述べた測定法を用いたカラーレーザープリンタからの発塵粒子に関する結果を示す。

5-1　実験方法

実験装置は，同様に第２章で述べた装置を用いた。試験体としてカラーレーザープリンタ CLP-1（2002 年製，600dpi，印刷速度 17 枚/分）を用いた。測定は，A4 用紙を 1 枚ベタ塗りした場合の総発塵量，発塵粒子の粒径分布の測定を行った。また，予備実験として今回用いたカラートナー（シアン（C），マゼンタ（M），イエロー（Y），ブラック（K）の 4 色）をそれぞれのカートリッジから取り出し，シリコンウエハ上に付着させて，SEM による形状観察および EDX による含有元素の分析を行った。その結果を Fig.5-1 に示す。トナーの粒径はモノクロ同様 3～5μm であることを確認できた。含有元素に関してはどのトナー粒子も炭素，酸素を含んでいることが分かった。ケイ素は，シリコンウエハ基板由来である。

さらに，東京工業大学藤井研究室の協力で，ガラス捕集管内でトナーを加熱（175℃）した際に発生する VOC の成分を GC-MS により測定した結果を Fig.5-2 に示す。トナーを加熱すると，アクリル-スチレン樹脂由来のスチレン以外にも多くの VOC が発生することが分かった。

5-2　実験結果および考察

カラー印刷に使用するトナー各 4 色のベタ印刷時と，給紙のみを行った場合の総発塵量を Fig.5-3 に示す。図より，印刷する色ごとの発塵量に顕著な差は見られなかった。また，モノクロ同様，0.3μm 以上の発塵量は非常に少ない。予備実験で観察したトナー粒子の粒径は 3～5μm であるので，カラーの場合もモノクロ同様，

発塵粒子の多くはトナー粒子自身ではないことが考えられる。また，モノクロ同様，給紙のみの場合でも相当量の発塵があるので，紙自身に発生源があることが予想される。

次に，各4色でカラー印刷を行った場合の発塵粒子の粒径分布をFig.5-4に示す。いずれの色でプリントした場合の発塵粒子も幾何平均径は0.035μm程度で，総発塵量同様，印刷する色ごとの発塵粒子の粒径分布に差は見られなかった。予備実験で測定した，トナー粒子の粒径は3～5μm程度であることから，発塵粒子はトナー粒子に比べて極めて小さいことが分かる。また，給紙時も印刷時とほぼ同様の粒径分布になった。以上のように，印刷の有無により粒径分布は変化しないことが示された。

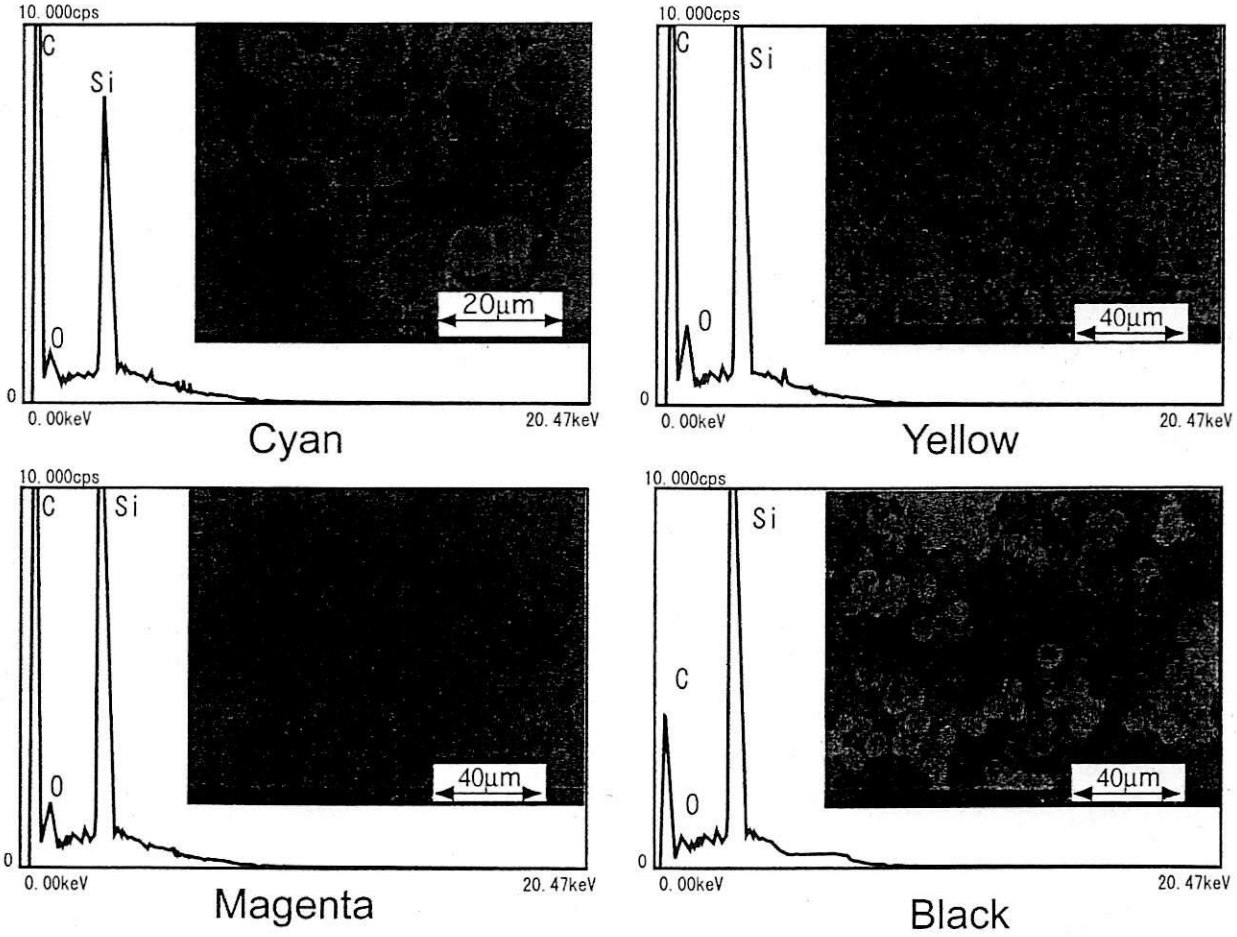
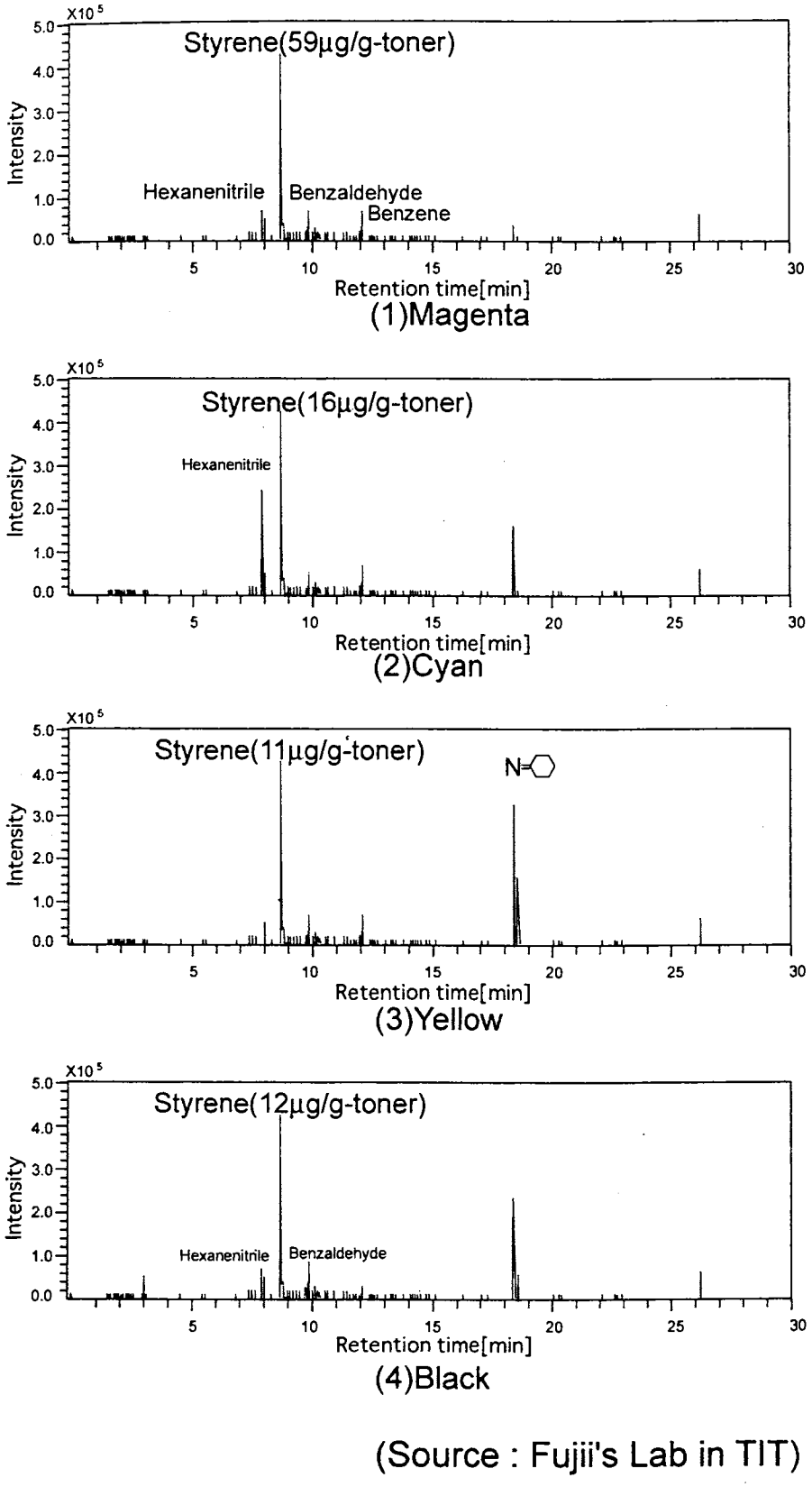


Fig.5-1 SEM graphs and elemental analysis for toner particles.



(Source : Fujii's Lab in TIT)

Fig.5-2 Total ion chromatograms of VOCs emitted from toner at 175℃

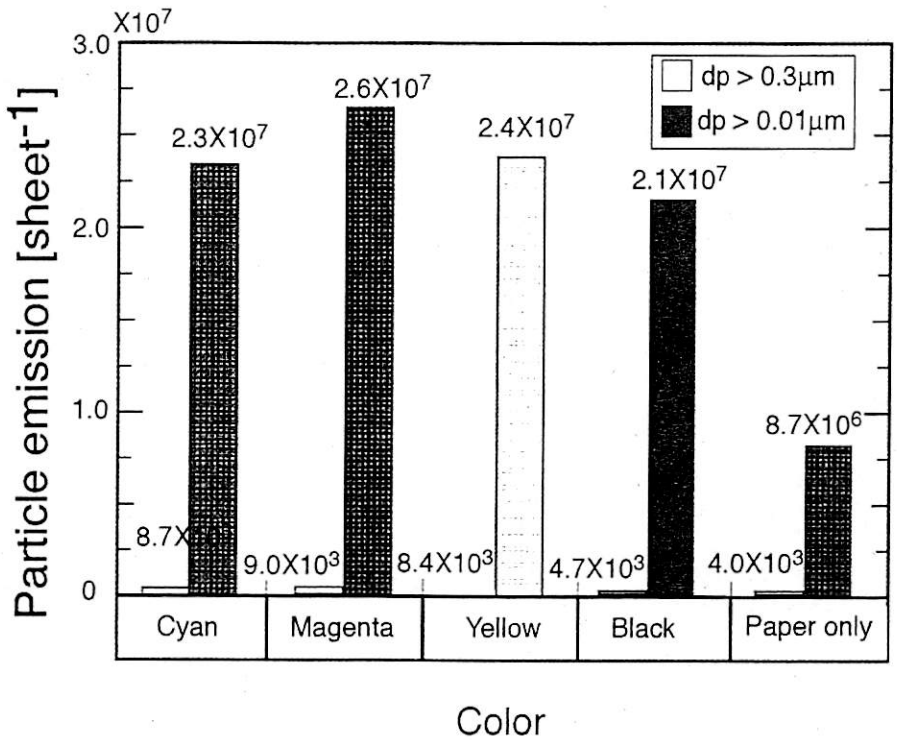


Fig.5-3 Comparison of particle emissions from a color laser printer.

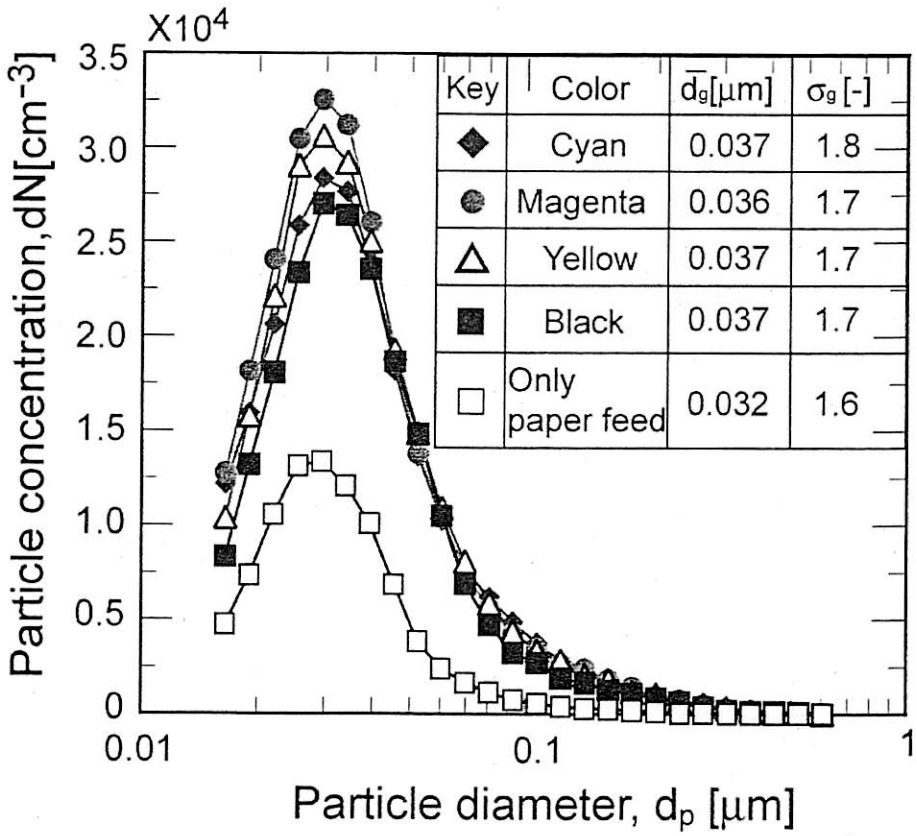


Fig.5-4 Size distribution of particles emitted from a color laser printer.

第６章　発塵機構に関する考察

本章では，ここまでの測定結果をもとに，発塵機構の考察を行い，発塵量低減の対策を提案する。

6-1　プリンタ内部の空気の流れ

プリンタの開口部からの発塵量については，Figs.3-7，4-5で示したとおりだが，プリンタ内の空気の流れと発塵の関係を調べるために，線香（毎日香：日本香堂）にカルナウバロウ（石津製薬株式会社）を含浸させた線香を用いて，気流の可視化を試みた。印刷を開始したプリンタの各開口部（Figs.3-7，4-5と同様の箇所）に着火した線香を近づけ，煙の流れを観察した。プリンタ周囲の空気の流れをFigs.6-1，2に示す。インクジェットプリンタでは，給紙された紙の流れに沿って空気が流れていることが確認された。一方，モノクロレーザープリンタも排紙口から空気が排出されている以外，他の開口部からは全て空気を吸い込んでいた。モノクロレーザープリンタでは，熱定着部で加熱された空気が熱対流により，プリンタ上部の排紙口から排気される流れが生じていることも確認できた。この結果より，前述の発塵量の測定値の発塵量の多い部位と空気の排出される部位とが一致していることが分かる。

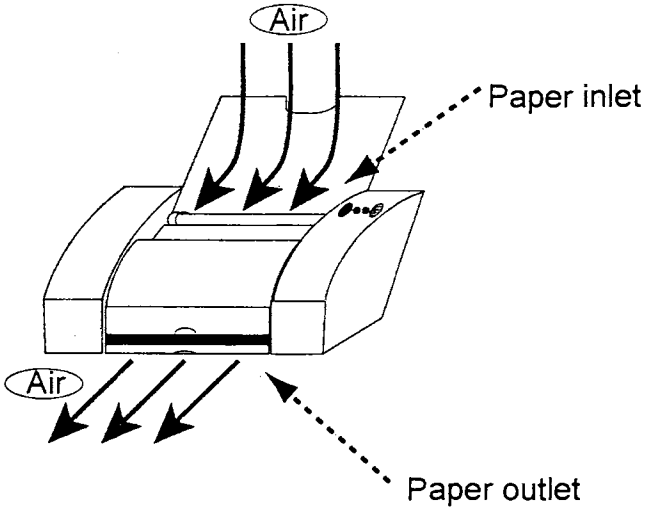


Fig.6-1 Air flow around an ink jet printer during printing.

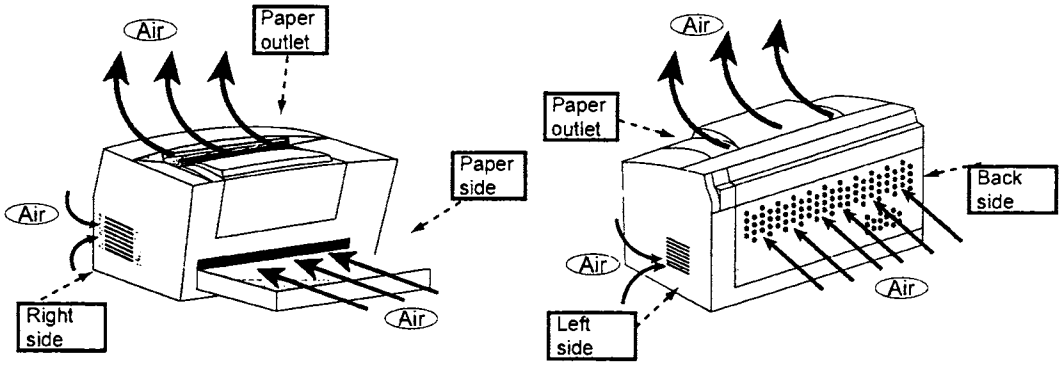


Fig.6-2 Air flow around a monochrome laser printer during printing.

6-2 発塵粒子の生成機構

次に，発塵粒子の組成を推定するために，ディフュージョンドライヤに発塵粒子を通して粒子を乾燥させることで，どのように粒径分布が変化するかを調べた。実験は，第2章に示した粒径分布測定法および Fig.6-3 に示す装置を用いて，発塵粒子を SMPS に導入する前にディフュージョンドライヤを通過させ，出口での粒径分布を測定した。ディフュージョンドライヤは，長さ 80cm×流路断面の直径 6cm（体積 2260cm^3）で流路外周にシリカゲルを厚さ 3cm で充填している。流量 0.3L/min では，滞留時間は約 45 秒となる。

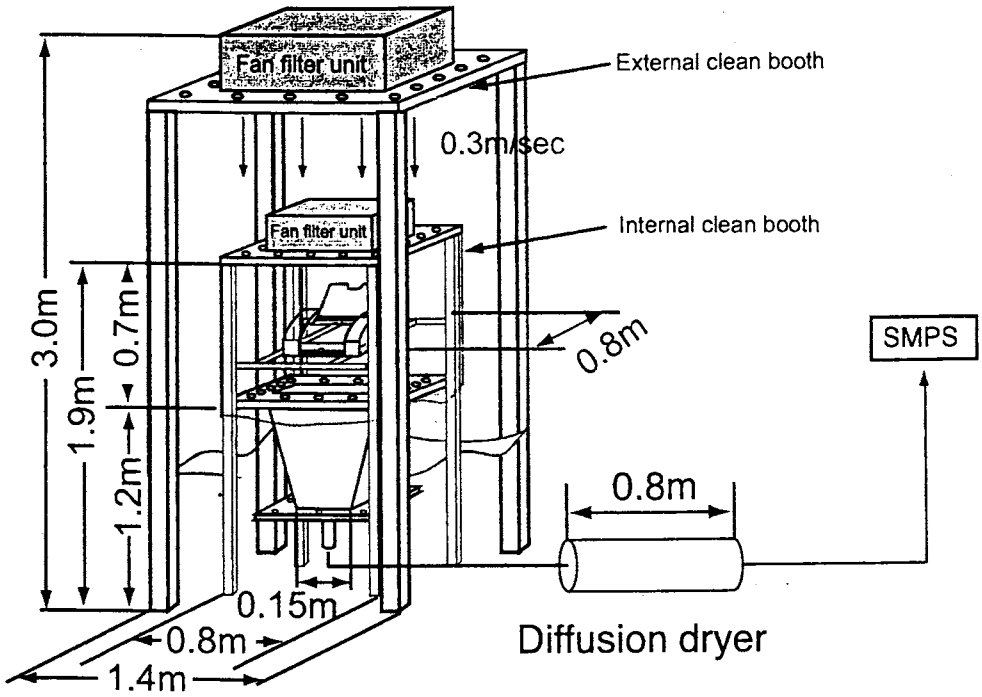


Fig.6-3 Experimental setup for measurement of size distribution of particles through diffusion dryer.

Figs.6-4，5，6にそれぞれ，モノクロレーザープリンタ，カラーレーザープリンタおよびインクジェットプリンタの結果を示す。レーザープリンタでは，給紙のみの粒子の結果も載せている。図より，モノクロレーザープリンタでは，給紙時の粒子は乾燥させることですべての粒径範囲にわたって一様に減少している。一方，印刷時の粒子は粒径の大きい方が選択的に減少している。これは，粒子の組成を反映していると考えられる。つまり，給紙のみの粒子は，ほぼ 100 %紙から蒸発した水分から構成されているのに対し，印刷時の粒子は水分以外に核となる他の不揮発性成分が含まれていることを意味している。核となる成分が具体的にどのような物質かは不明であるが，定着時に加熱されたトナーから発生している VOC 中でも発生量の多いスチレンの可能性が高いと考えられる。スチレンは融点-30.6℃，沸点 145.2℃で，加熱により容易に重合しやすい。以上のことから，モノクロレーザープリンタからの発塵機構は以下のように考えられる。

Fig.6-7 に示すように，定着時にトナーおよび紙が加熱されることでトナー中の揮発成分を核として，紙から蒸発した水分により，不均一相均一核生成が起きる。そして，熱対流によりプリンタ上部から粒子が放出される。その後，室内空間を浮遊する間に水分は蒸発するが 30nm 程度の安定した核の部分は長期間安定して存在する。

次に，カラーレーザープリンタでは，粒子を乾燥させた場合に，モノクロと異なり，給紙のみを行った場合でも，モノクロ印刷時と同様に大粒径の粒子が選択的に減少していることが分かる。これは，カラートナーに含まれている印刷添加剤，オフセット防止剤がカラー印刷を行った際に定着ドラム上に付着し，トナーに含まれる VOC もドラム表面に移行するため，給紙のみの場合にも紙に添加剤と共に VOC が付着する。そのため，モノクロ印刷時と同様の粒子が発生すると考えられる。一方，カラー印刷を行った場合は，粒径分布にほとんど変化が見られなかった。つまり，カラー印刷時の発塵粒子には紙から蒸発した水分はほとんど含まれていないと言える。これは，カラートナーに含まれる，印刷添加剤，オフセット防止剤により紙表面がフィルム状にコーティングされるため，紙からの水分の蒸発が阻害されるためと考えられる。しかし，ブラック印刷時は，モノクロレーザープリンタ同様に，大きな粒径の発塵粒子が選択的に減少している。これは，ブラックトナーには，他の 3 色に比べ添加剤の含有量が少ないため，モノクロレーザープリンタと同様の機構による発塵が起こるためであると考えられる。また，前述したようにトナー加熱時にはスチレンが大量に発生している。このことより，スチレンが発塵粒子の核になることが考えられる。以上のことよりカラーレーザープリンタの発塵機構としては以下のように考えられる。

ブラック印刷時には，前述したモノクロレーザープリンタと同様の機構により発塵していると考えられる。一方，カラー印刷時

は，Fig.6-8に示すように，定着時にトナーが加熱されること（150～200℃）によりトナーに含まれているスチレン等のVOCが揮発する。この際，モノクロレーザープリンタと異なり，紙からの水分の蒸発はほとんど起こらない。このVOCが，室温（約25℃）で急冷されることにより過飽和となり核生成を起こす。そして，プリンタ内の流れにより上部から粒子が放出される。

次に，インクジェットの結果を見ると，レーザープリンタの印刷時の結果と同様の傾向を示している。これは，発塵粒子が固形分の核と水分から構成されていることを意味している。前章の測定結果を合わせて，インクジェットプリンタの発塵機構は以下のように考えられる。

Fig.6-9に示すように，プリンタヘッドから吐出されるインク滴と共に発生するサテライト粒子が，紙の排紙に伴って生じる空気の流れにより，排紙口から発生する。粒子は，発生時にはインクと同様の組成を有するが，空間に放出されると徐々に水分が蒸発し，最終的には固形分のみになると考えられる。

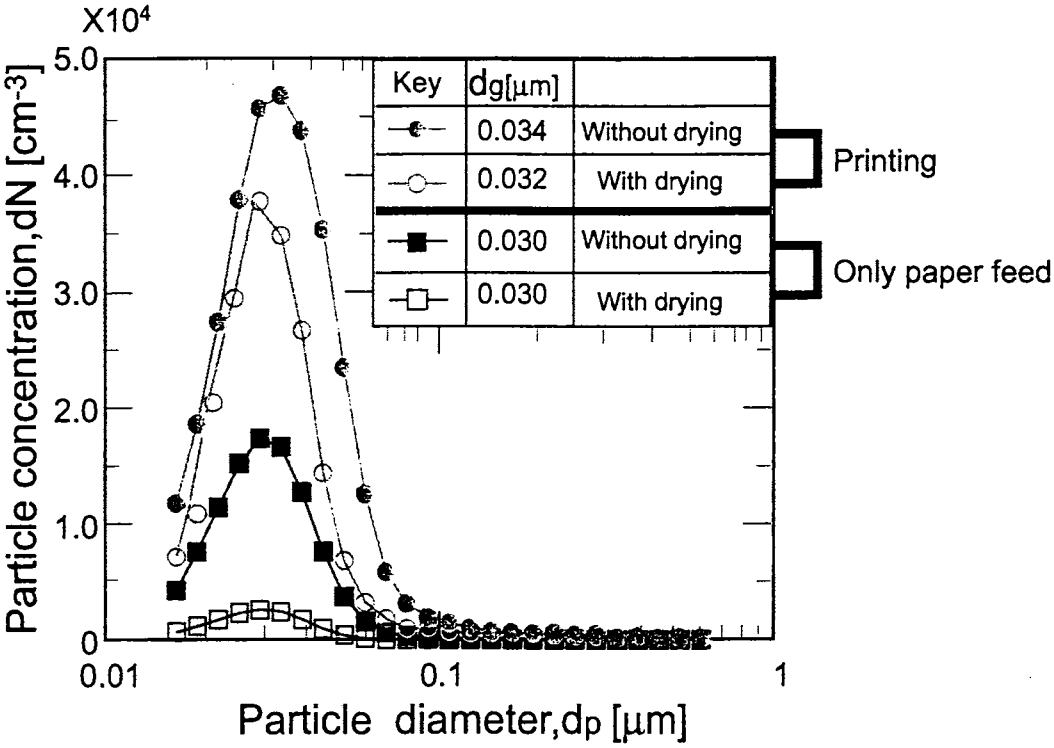


Fig.6-4 Comparison of size distributions of particles emitted from a monochrome laser printer with and without drying.

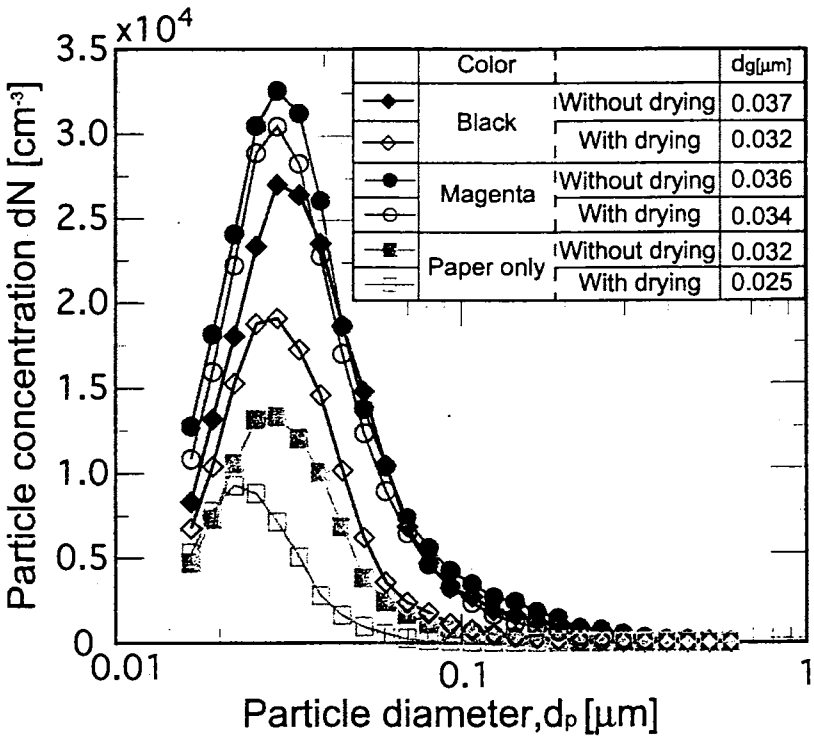


Fig.6-5 Comparison of size distributions of particles emitted from a color laser printer with and without drying.

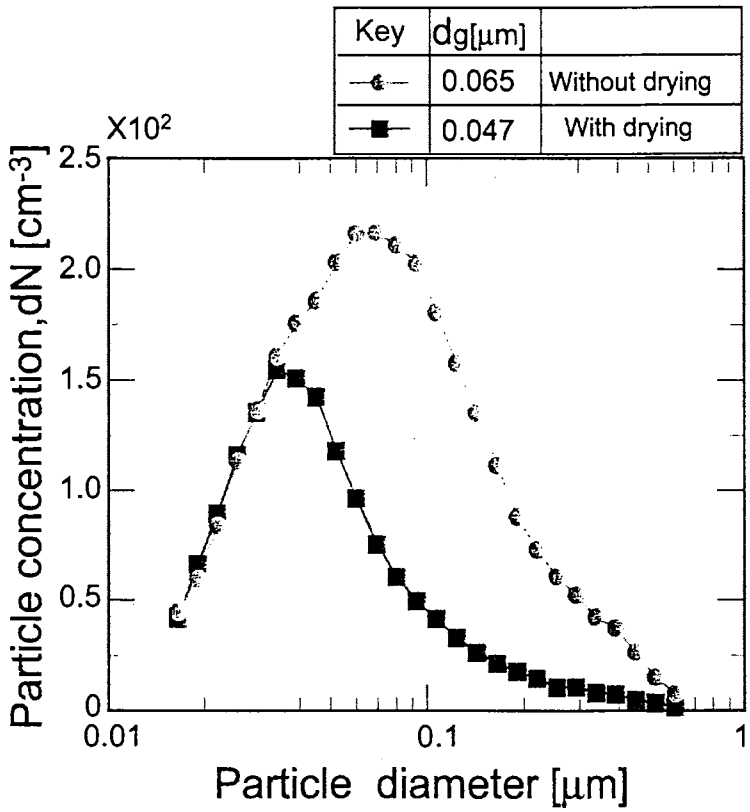


Fig.6-6 Comparison of size distribution of particles emitted from an ink jet printer with and without drying.

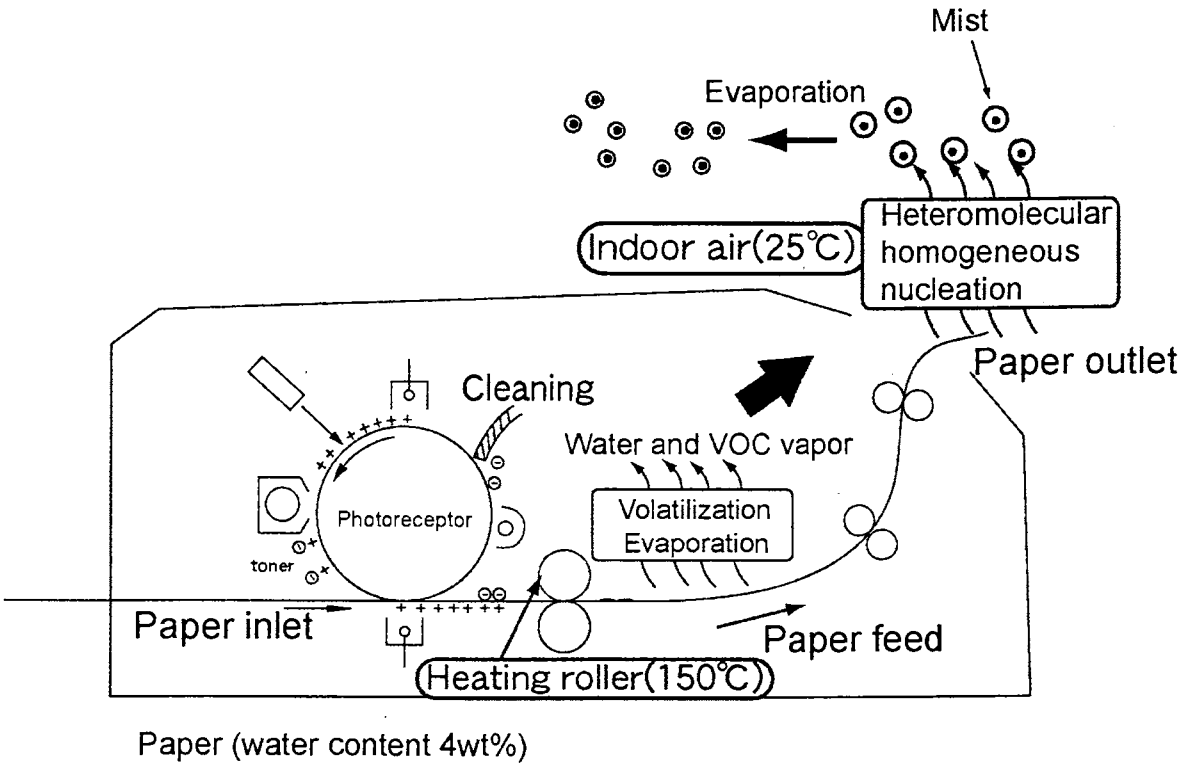


Fig.6-7 Mechanism on particle emission from a monochrome laser printer.

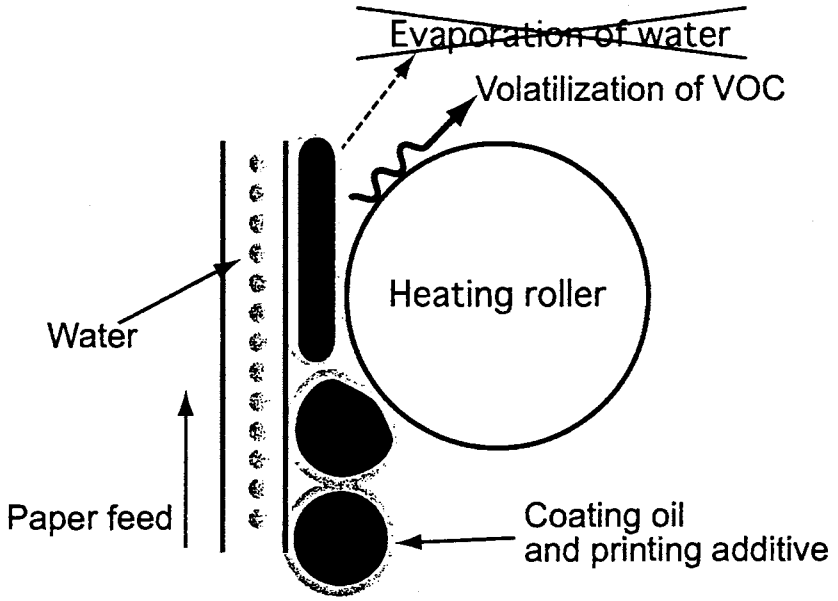


Fig.6-8 Mechanism on particle emission from a color laser printer.

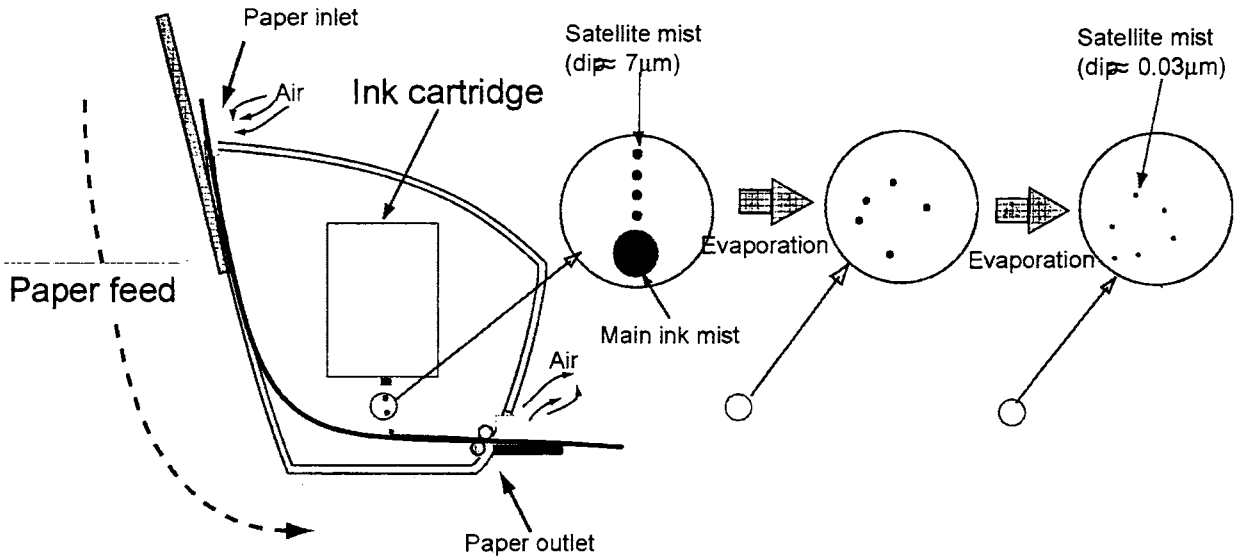


Fig.6-9 Mechanism on particle emission from an ink jet printer.

6-3 発塵量低減の対策

インクジェットプリンタからの発塵の主原因がインクの吐出によるものであるとすると，インクの物性を変化させることによる発塵量の低減という手段が考えられるが，印刷の性能（印刷速度，解像度など）を低下させるおそれがあるため，あまり有効な手段とは言えない。そこで，発生した粒子を捕集することにより，発

塵量を低減する方法について考える。まず，捕集を行う場所は，粒子の排出が多い排紙口で行う。粒径の大きな粒子（粒径 0.3μm 以上）は，大部分が帯電しているので，静電気的な除去（平行平板電極による除去など）が有効と考えられる。粒径 0.3μm よりも小さな粒子では，エアフィルタによる除去が考えられる。しかし，気流制御を行わない条件であるので，低圧損のフィルタ（エレクトレットフィルタなど）を用いるのが妥当と考えられる。

レーザープリンタからの発塵の主原因が，トナーの揮発成分と紙の水分からなる不均一相均一核生成であると考えられる。空間を浮遊する間に水分は蒸発すると考えられるが，トナー由来の成分は容易に蒸発せずに安定して室内空気中に残る可能性がある。そのためインクジェットプリンタと同様に対策が必要である。捕集対象とする粒子の平均粒径が 0.035μm 程度であるので，粒子の拡散を利用した捕集が有効であると考えられる。一方，レーザープリンタの空気の排出が，主に熱定着部の加熱により生じる上昇流によって起こることから，プリンタの上部に低圧損のエアフィルタを設置することが妥当と考えられる。

第７章　結論

本研究は，インクジェットプリンタ，モノクロレーザープリンタ，カラーレーザープリンタそれぞれからの発塵粒子の特性を調べ，その発塵量の低減についての提案を行うことを目的として，それぞれのプリンタをチャンバー内に設置し，印刷を行った際の発塵粒子について，発塵量，粒径分布，帯電量分布の測定，形状観察および含有元素分析を行い，発塵機構について考察し，発塵量の低減についての提案を行った。以下に得られた知見を述べる。

(1) インクジェットプリンタの発塵量は，印刷する色により違い，ブラック印刷時に多く，他のカラー３色印刷時は比較的少ない。

(2) インクジェットプリンタからの発塵粒子の平均粒径について，ブラック印刷時は 0.065μm，シアン印刷時は 0.018μm，マゼンタ印刷時は 0.023μm，イエロー印刷時は 0.028μm である。

(3) インクジェットプリンタからの発塵粒子のうち，粒径の小さい（粒径 0.3μm より小さい）ものは約 80 %が無帯電粒子である。しかし，それ以上の粒径の粒子は 80 %以上が帯電粒子である。

(4) インクジェットプリンタの発塵の主原因となっているのは，インクを吐出する際に主インク滴より解離したサテライトである。

(5) インクジェットプリンタからの発塵粒子は，空気中を浮遊している内に徐々に水分が蒸発して，最終的には固形分のみになる。

(6) インクジェットプリンタからの発塵粒子の含有元素は，炭素，酸素が 4 色とも含まれており，その他シアンが鉄，カルシウム，クロム，ホウ素，マゼンタが鉄，クロムを含んでいる。

これらの元素は，インクに色材として入っている染料由来のものであると考えられる。

(7) インクジェットプリンタからの発塵は，粒径の大きな粒子（粒径 0.3μm よりも大きいもの）については平行平板電極等の静電気的な捕集法による除去が有効であり，小さい粒子については拡散を利用した除去が有効である。また，除去を行う場所は，プリンタからの発塵粒子が，紙の流れにのって排紙口から排出されるものが主であるため，排紙口で行うのが妥当である。

(8) モノクロレーザープリンタの発塵量は，機種により差があるが，インクジェットプリンタに比べ非常に多い。また，給紙のみを行った場合でも 1/3 程度発塵している。

(9) モノクロレーザープリンタからの発塵粒子の平均粒径は，LP-1，LP-3 では 0.03μm 程度であり，LP-2 では 0.062μm である。また，給紙のみを行った場合の発塵粒子の粒径分布はベタ印刷を行った場合と類似している。

(10) モノクロレーザープリンタから発塵した粒子は，ほぼすべてが無帯電粒子である。

(11) モノクロレーザープリンタでは，定着の際に紙に熱をかけることにより紙から水蒸気が発生し，過飽和になった水蒸気が核生成を起こしている。そのことが，発塵の主原因となっていると考えられる。また，この熱の影響で上昇する空気の流れが生じ，その流れにのって粒子が発塵している。

(12) カラーレーザープリンタからの発塵量は，印刷する色による差はない。また，給紙のみを行った場合にも，1/3 程度の発塵が見られる。

(13) カラーレーザープリンタからの発塵粒子の粒径分布は，どの色も約 0.03μm 程度であり，印刷する色による差は見られない。また，給紙のみの場合にも同様の粒径分布を示した。

(14) カラーレーザープリンタでは，カラー印刷の場合は定着の際に熱をかけることにより，トナーからスチレン等のVOCが揮散する。これが，急冷されることにより過飽和となり核生成を起こしている。

(15) カラーレーザープリンタでは，紙からの水分の蒸発は，カラートナーに含まれる印刷添加剤，オフセット防止剤が印刷表面にフィルム状にコーティングされることにより阻害される。

(16) カラーレーザープリンタで，ブラック印刷を行った場合の発塵機構は，カラートナーに比べ印刷添加剤，オフセット防止剤の含有量が少ないため，水分の蒸発が阻害されず，モノクロレーザープリンタとほぼ同様である。

(17) レーザープリンタからの発塵粒子の除去を行うためには，熱対流による上昇流を利用し，低圧損フィルタにより除去する方法が有効である。

Nomenclature

C_C	: Cunningham's coefficient	[-]
d_p	: particle diameter	[m]
e	: elementary unit of charge ($=1.6\times10^{-19}$)	[C]
E	: strength of electrical field	[Vm^{-1}]
$f(n_p)$	: frequency of particles carrying n_p elementary charges	[-]
h_h	: height of droplet	[m]
k	: Boltzmann's constant($=1.38\times10^{-23}$)	[JK^{-1}]
L	: length of parallel plate electrodes	[m]
M	: number of plates	[-]
n_p	: number of charges	[-]
$\overline{n_p}$	: mean number of charges	[-]
N	: particle generation rate	[min^{-1}]
P	: particle penetration	[-]
Q	: air flow rate	[m^3min^{-1}]
$\bar{u}$	: mean flow velocity	[ms^{-1}]
V	: applied voltage	[V]
Z_p	: electrical mobility of particle	[$m^2V^{-1}s^{-1}$]

参考文献

1) （社）電子情報技術産業協会: 情報端末ガイドー現状および将来動向, http://it.jeita.or.jp/document/ittguide/data.html

2) 大西弘幸: 紙パルプ技術協会誌, 第 55 巻, 第 4 号

3) 甘利武司（監修）他: インクジェットプリンター技術と材料

4) 甘利武司（編著）他: 色材物性工学

5) 高橋恭介, 入江正浩他: プリンター材料の開発

6) ドイツ連邦環境省: ブルーエンジェル, http://www.blauer-engel.de/

7) 大谷吉生, 津田陽: エアロゾル研究, 14 (4), 323-327 (1999)

8) T. Tuomi: Applied Occupational and Environmental Hygiene ,Vol.15(8)(2000):629-634

9) S. C.Lee: Building and Environment, 30 (2001) 837-842

10) E. Nies: Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft, 60 (2000)

11) 日本工業規格: JIS B 9926-1991, クリーンルームー使用する機器の運動機構からの発じん量測定方法

12) TSI Incorporated: Model 3936 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) Instruction Manual

13) 堀場製作所: エネルギー分散型 X 線分析装置 EMAX-5770W 取り扱い説明書

14) 黒野あゆち: 金沢大学修士論文 (1999)

15) W. C. Hinds: Aerosol Technology

II　プリンタの化学物質発生特性と室内空気汚染

第１章　プリンタによる室内空気汚染
第２章　プリンタの存在する室内空気質の実測
第３章　プリンタから発生する汚染物質のチャンバーを用いた測定
第４章　結論

II　プリンタの化学物質発生特性と室内空気汚染

第１章　プリンタによる室内空気汚染

1－1　室内空気質[1)2)3)]

近年，室内の快適性や健康問題を考える上で，室内空気質の向上に関心が高まっている。室内空気質を向上させるためには，空気質の物理化学的な内容と共に，人間が室内環境条件によってどのような健康条件を受けるかについても知る必要がある。健康被害を及ぼす空気質の要素として，二酸化炭素，一酸化炭素，臭気，揮発性有機化合物（VOC），窒素酸化物（NO_x），浮遊粉塵，オゾン，微生物，たばこ煙などが挙げられる。表 1-1 に各物質の健康影響および環境規準を示す。

これらの要素が汚染物質として振る舞うと，人体に対して健康被害を及ぼすことが知られており，中にはアレルギーや化学物質過敏症の原因となる物質や，発ガン性や遺伝子毒性をもつ物質もある。日本では，ビル衛星管理法によって環境規準として浮遊粉塵および二酸化炭素，一酸化炭素，ホルムアルデヒドの基準値が定められている。

近年のオフィスでは，情報関連機器が多く導入され，室内の仕上げ表面の室容積に対する比率も大きくなった結果，情報関連機器や建材から発生する汚染物質による新しい室内空気室汚染が増えてきている。

建築技術の向上や省エネルギー化によって室内環境の気密化が進んだ結果，汚染質の除去能力が低下し，居住者の健康が損なわれている。これらの汚染質を除去する手段として，一般的には換気による屋外への排出，フィルターによる除去という方法がとられているが，建設時から建材の選定から家具の選定まで汚染質の発生源の除去にも配慮すべきである。建築物の性能として，室内環境の快適性を決定する室内空気質は重要な要素である。

表 1-1 室内空気汚染質の概要 4)

健康影響、基準、対策など

要素	発生源	実態	被害・影響	既存基準	提案水準	対策・その他	測定法
二酸化炭素 （1ppm=1.8mg/m³ 1mg/m³=0.556ppm）	人間・動物の代謝、 燃料ガスの燃焼	屋外 0.7mg/m³（400ppm） （自然環境） 室内 日本 ~3,000ppm（住宅） 800~900ppm （事務所ビル） アメリカ 500~1,300ppm （事務所ビル、住宅）	6,300mg/m³（3,500ppm）以上で 血液の酸塩基平衡に影響 10,000ppmで頭痛 高濃度で中枢神経系抑制 （50,000ppm）	（室内汚染の指標として） 事務所・一般環境 日本 1,000ppm（ビル管法） 5,000ppm（事務所則） アメリカ 2,500ppm ASHRAE カナダ 6,300mg/m³ （3,500ppm：長期間曝露） 産業現場 アメリカ NIOSH・ACGIH 5,000ppm（8時間許容値：TWA）	1,000ppm以下 <生体機能へのCO_2の影響は高濃度のレベルにおいてのみ認められているが、CO_2が室内環境の指標としての基準として用いられているので、これに従った>	・開放型暖房器の使用制限 ・高気密型住宅では換気の確保	検知管法 赤外線ガス分析法
一酸化炭素 （1ppm=1.145mg/m³ 1mg/m³=0.873ppm）	屋外： 自動車 工場 屋内： 調理器具 暖房器 喫煙	屋外 0.01~0.20ppm （自然環境） 17.5ppm（8時間平均） （都市） 室内 台所：10~30ppm カフェテリア 禁煙席0.7ppm 喫煙席1~5ppm 事務所ビル 2.8±1.3ppm 日本 1.7~5.2ppm 米国	一酸化炭素中毒 COHbが10%以上で症状が出現 最大酸素摂取能力（作業能力）の低下 （5%COHbより出現） 狭心症発作（既往症） （5%COHbより出現） 神経系 監視作業能力低下（5%COHbより） 頭痛・めまい（10~15%COHbより） 循環系 血液pHの低下、緩衝能力の低下 （10~15%COHbより） 胎児への影響 出生時体重の減少、出生後の発育遅延 COHbのレベル 非喫煙者 1.2~1.5% 喫煙者 3~4% ヘビースモーカー ~10% 感覚系 1.5ppmCO以上で目への刺激増大 （受動喫煙）	事務所・一般環境 日本 10ppm（環境基準 1時間値の日平均） 10ppm（ビル管法） 20ppm（学校衛生） アメリカ 10mg/m³（8時間環境基準） 40mg/m³（1時間）EPA 10mg/m³（1時間）ASHRAE カナダ 11ppm以下（8時間平均濃度） 25ppm以下（1時間平均濃度） WHO EUROPE 100mg/m³（15分間：STEL） 60mg/m³（30分間：TWA） 30mg/m³（1時間：TWA） 10mg/m³（8時間：TWA） 産業現場 日本 10ppm（事務所則） 50ppm（産業衛生学会勧告値） アメリカ 55mg/m³ （8時間許容値）ACGIH	瞬時的には10ppm以下、その他は2ppm以下、できれば1.5ppm以下 （COの人体影響はCOHbのレベルにより決まるが、WHOでは一般人での許容最大レベルを2.5~3.0%としている。COHbレベルは環境濃度と曝露時間により影響されるが3%以下に保つためには、環境濃度を10ppm以下にする必要がある。ただし、受動喫煙の場合、感覚的には2ppmを超えると不快感、目の痛み等が出現する。それ故、短い時間では10ppm以下、その他では2ppm以下を提案した。感覚的影響には個人差があるので、できれば1.5ppm以下。）	・発生源である喫煙（場所）の制限 ・喫煙場所となる居間等に特別な排気装置を設置 ・開放型暖房器の使用制限、少なくともFF式の暖房器を設置することが望ましい ・調理器具使用時の換気確保 調理時には大量の排ガス、水蒸気、臭気が出るので、それらを直接屋外に排気できる装置が不可欠である	検知管法 定電位電解法
二酸化窒素 （1ppm=1,880mg/m³ 1mg/m³=5.32×10-1ppm）	屋外 工場、自動車 屋内 ガス器具、 石油ヒーター・ 喫煙	屋外 自然環境 0.4~9.4μg/m³ 先進諸国 年平均20~90μg/m³ 交通量が多い道路 ~0.5ppm 日本 年平均0.026ppm 室内 紙巻1本の喫煙 150,000~226,000μg/m³ （80~120ppm） 換気無しのガスストーブ 200μg/m³（0.1ppm） （数日以上） 調理中の台所 470~1,880μg/m³ （0.25~1.0ppm） 瞬間湯沸器の使用 1,000~2,000μg/m³ （0.53~1.06ppm）	短期間曝露 1,800μg/m³以下での毒性はほとんどない（動物実験） 3,000~4,000μg/m³で頭痛、胸痛出現 4,700μg/m³（2.5ppm）、2時間曝露で呼吸機能の低下（健康人） 560μg/m³（0.3ppm）、30分間曝露で喘息患者の呼吸機能低下 長期間曝露（数週間以上） 1,880μg/m³（1ppm）以下で肺、肝臓等にうっ血 190μg/m³（0.1ppm）以上で[illegible] 940μg/m³（0.5ppm）以上で 肺の細菌感染増加 感覚への影響 200~410μg/m³（0.11~0.22ppm）で 悪臭を感じる	事務所・一般環境 日本 ：0.04~0.06ppm （環境基準） アメリカ：250ppb （1時間平均値：California） 160ppb （1時間平均値：Colorado） 50ppb （年平均許容値）EPA カナダ ：短期間許容値 0.48mg/m³（0.25ppm） 長期間許容値 0.1mg/m³（0.053ppm） WHO EUROPE：400μg/m³ （0.21ppm：1時間値） 150μg/m³ （0.08ppm：1日値） 産業現場 アメリカ：3ppm NIOSH （8時間許容値：TWA：PEL） 日本 ：5ppm （産業衛生学会勧告値）	長時間では0.04ppm以下、短時間では0.3ppm以下 （室内ではNO_xの発生は主として開放型暖房器によるものであり、その影響は呼吸器疾患既往者にまず現れる 喘息発作や呼吸器疾患の増加を考慮し、短時間では0.5ppmを超えないことが望ましい）	・発生源である開放型暖房器の使用制限 ・調理器具使用時の換気確保	検知管法 比色定量法 （ナフチルエチレンジアミン法）

表 1-1　室内空気汚染質の概要（つづき）

オゾン （1ppm＝2mg/m³）	二酸化窒素に対する紫外線照射により生じる コピー機 電気集塵機	屋外 自然環境 40～60μg/m³以下 （1時間値） 都会 350μg/m³（西欧） 400μg/m³（アメリカ） （1時間値） 屋内 室内/室外比 0.10～0.25 （換気量に比例） 空気清浄器使用時 0～0.5mg/分	短期間吸収 100μg/m³（0.1ppm）で 眼に刺激を感じる 1,000μg/m³（0.5ppm）で 鼻、気道に違和感 長期間吸収（数週間以上） 220μg/m³（0.11ppm）で肺機能低下 160～300μg/m³（0.08～0.15ppm）で 咳、損傷等の症状出現 240～400μg/m³（0.12～0.2）ppmで 脳の生化学的変化（動物実験）	事務所・一般環境 日本：0.06ppm※ （1時間値：環境基準） アメリカ：160μg/m³※ （1時間値） カナダ：短期間許容値 0.24ppm/m³（0.12ppm） （1時間平均濃度） WHO EUROPE：150～200μg/m³ （0.073～0.1ppm：1時間値） 100～120μg/m³ （0.05～0.06ppm：8時間値） 産業現場 日本：0.1ppm（産業衛生学会） アメリカ：0.1ppm（ACGIH）	短時間でも0.1ppmを超えないことが望ましい （ただし、コピー機等紫外線を照射する機器を設置する以外は住宅では問題となることはほとんどないものと思われる） ※光化学オキシダント濃度による。	・電気集塵機の使用制限または使用時間制限（産業用の空気清浄器のほとんどはフィルター式のものである）	紫外線光度測定法 検知管法
ホルムアルデヒド （1ppm（20～25℃）＝1.2mg/m³）	工場製品 （断熱材、合板、家具） 建築物 暖房、ヒーター 調理器具	屋外 0.007ppm以下 屋内 高気密住宅： 0.01～0.12ppm 省エネビル： 0.11～0.21ppm	短期間吸収 刺激を感じる最低濃度0.1mg/m³ 0.3～1.0mg/m3から明確な刺激を感じる 鼻や眼の痛み：2.5～3.7mg/m³以上 耐久30分間（涙）：5～6.3mg/m³ 生命の危険：37～60mg/m³以上	事務所・一般環境 アメリカ：0.3mg/m³（0.2ppm） Wisconsin, California カナダ： 短期間許容値 0.12mg/m³（0.1ppm） 長期間許容値 0.06mg/m³（0.05ppm） WHO EUROPE： 0.1mg/m³（30分間の平均値）	検出されないことが望ましい （家具等から発生するもの以外ははとんど問題ないと思われる）	・合板等に使用する接着剤の規制 ・ホルムアルデヒドを含有する断熱材の規制	ガスクロマトグラフィー
浮遊粒子状物質（粉塵）	工業製品（断熱材、合板、家具）、建築物 暖房、ヒーター 調理器具 清掃時	屋外 都会：0.035～0.05mg/m³ 屋内 省エネビル： 0.1～1.0mg/m³ 喫煙（主流煙）： 60～130mg/m³ 掃除時 ～0.25mg/m³	呼吸器系疾患を有する患者の疾病増加 24時間平均値0.15mg/m³ 1時間平均値0.3mg/m³を超えると、病弱者・老人の死亡率が増加する	事務所・一般環境 日本：0.15mg/m³（ビル管理法） アメリカ：0.075mg/m³ （年平均）EPA カナダ： 短期間許容値 0.12mg/m³（0.1ppm） 長期間許容値 0.06mg/m³（0.05ppm） WHO EUROPE： 0.1mg/m³（30分間の平均値） 100～120 g/m³ （0.05～0.06ppm：8時間値） 産業現場 日本・アメリカ （産業衛生学会、ACGIH） 2mg/m³（遊離珪酸20%以上） 5mg/m³（遊離珪酸20%未満） 10mg/m³（その他）	0.1mg/m³以下が望ましい（清掃時ではは清掃者の顔付近で上記が達成されること） 受動喫煙に伴う空気汚染の場合も上記に準ずる （0.1mg/m³を超えると児童、老人において気道抵抗の増加等生理的な変化が生じる）	・粉塵をまき散らさない掃除機の開発 ・清掃時の換気に注意 ・喫煙の制限または喫煙場所の制限	光散乱式粉塵計 フィルター法 （重量法）
アスベスト	紡織、製造工場 工業製品、建築材料 交通機関 （ブレーキ）	屋外 自然環境：100本/ℓ以下 交通量の多い交差点： 900本/m³ 高速道路：～3,300本/m³ 屋内 アスベスト不使用のビル ～1,000本/m³ 崩壊しやすいアスベスト使用のビル： ～10,000本/m³ アスベスト製造工場： 10^5～10^6本/m³	アスベスト肺、肺がん（喫煙者で増加）中皮腫	一般環境 日本：10本/ℓ （アスベスト取扱工場との境界線）環境庁 WHO EUROPE：安全基準を確立できず 産業現場 日本：0.2本/ml （産業衛生学会勧告） アメリカ：0.2本/ml （8時間平均：NIOSH）	検出できないこと	・アスベストを含有した建築材料の使用禁止	フィルター法 （光学顕微鏡・電子顕微鏡によるカウント）
ラドン （1pCi/ℓ＝37Bq/m³）	ラドン-222（ウラン-238の崩壊） ラドン-220（トリチウム-232の崩壊） 建材に含まれる	室内 ラドン検出値：15Bq/m³ （アメリカ）	肺癌の5～15%はラドンによるものと推定	住居・事務所 WHO EUROPE： 新築の住居は100Bq/m³以下	100Bq/m³以下 （建材に含まれるものがほとんどであり、地下室等換気がない場合以外は問題とならない）	・ラドンを含有する建材の規制 ・地下室等での換気の徹底	シンチレーションカウンター

1-2 プリンタから発生する汚染物質

1-2-1 汚染物質の概要

プリンタから発生する汚染物質として，オゾンおよび粒子，ＶＯＣが予想される。その発生機構は 1-2-2 に記すものとし，ここではこれらの物質の特徴を詳しく説明する。

(1) オゾン（O_3）

オゾンは，分子量 48，融点-192.7℃，沸点-111.9℃で，常温で特異な刺激臭をもつ青い気体である。非常に強い酸化作用を有するので，発生してもすぐに他の物質と反応するため不安定である。成層圏にはオゾン濃度が高い層（オゾン層）が存在し，太陽からの紫外線を吸収して地上の生物を保護している。またその酸化作用・殺菌効果は水・空気の浄化に広く利用されている。

しかし，オゾンは人体に対しては有害性である。短期間曝露の場合，0.1ppm で鼻・喉への刺激，0.1～0.3ppm で喘息発作や慢性気管支炎の発生，長期間曝露の場合，0.11ppm で肺機能低下などが指摘されている。屋外におけるオゾンの大部分は，炭化水素や窒素酸化物と紫外線の光化学反応によって生じたものである。一方，室内のオゾン発生源としてはコロナ放電式空気清浄機，コピー機，プリンタなどを挙げることができる。

日本におけるオゾンの一般環境基準は，光化学オキシダント濃度の１時間値として 60ppb である。室内の基準値としてはドイツのブルーエンジェル規格[5)]では 0.1ppm 以下となっている。

(2) 粒子

空気中を浮遊する液体相および固体相の物質を浮遊粒子状物質（SPM: Suspended Particulate Matter）と総称する。ビル衛星管理法では，室内に浮遊している粒子状物質を総称して浮遊粉塵と定義している。浮遊粉塵の種類は多様で，化学的性質・物理的挙動が著しく異なるため，その全体像を把握することは容易ではない。

粒子の人体影響については，濃度と同時に粒径による影響も非常

に大きい。粒子は眼，皮膚の他，主として呼吸器に影響を及ぼす。呼吸器にとどまる時間，沈着する部位，除去メカニズムは粒径によって違ってくる。小さい粒子は肺胞まで達する。肺内に到達した粒子は長期間体内にとどまるため，その化学的性質と物理的性状により様々な障害を引き起こす可能性がある。

人体の呼吸器官に取り込まれ易い粒径は 0.1μm 前後で，本研究では 20～500nm の粒径を対象としている。現在，日本ではプリンタ・コピー機を発生源とする粒子の基準は，エコマークの規格[6]で存在するものの，厳格な規制はまったく行われていない。一方，ヨーロッパではブルーエンジェルラベルの規格をもとに規制がなされており，室内空気濃度で 0.075mg/m^3（最大放出濃度：連続した日の 24 時間平均値）となっているが，粒径別の評価がなされていないため十分とは言えない。

(3)　VOC[7)8)]

VOC とは Volatile Organic Compound（揮発性有機化合物）の総称であり，国際的に通用している定義はないが，一般的に用いられているものは表 1-2-1 に示す世界保健機構（WHO）による沸点に基づく分類がある。その場合，VOC とは沸点が 50℃から 240～260℃までの有機化合物のことを指し，アルカン，芳香族炭化水素，テルペン類など様々な物質が含まれている。表 1-2-2 に示すように WHO ではこれらの分類ごとにガイドライン値を示しているが，詳細な定義はまだ確立されていない。また，複合汚染による影響は不明の点が多い。トルエン，キシレンなど毒性の強い物質に対する対策が必要とされるが，複数の物質の毒性が問題であるため，数種の物質の削減のみでは根本的な解決とはならない。VOC に対し，総揮発性有機化合物（TVOC; Total Volatile Organic Compound）という言葉もあるが，これについても正確な定義が定まっておらず，一般にはガスクロマトグラフによって分離定量された VOC の総量を示すものと解されている。

VOC の発生源は，まず室外と室内に大別できる。室外では自動車や工場からの排ガス，室内では建物・建材の接着剤，建物のメンテナンス用の塗料・溶剤・床ワックス，家具のメンテナンス用洗剤，化学合成繊維の絨毯などが挙げられる。また，殺虫剤や防虫剤，消臭剤や芳香剤，喫煙等の居住者のライフスタイルに起因する要素のほか，居住者自身から発生する場合もある。家具，喫煙，開放型燃焼機器，暖房機器からホルムアルデヒド，殺虫剤からトルエン，防ダニ・防虫剤からパラジクロロベンゼン，清掃剤からトルエン，キシレンなどの VOC が発生する可能性がある。プリンタ・コピー機から発生する VOC としてはスチレンが明らかにされており，WHO 規格で 0.07mg/m^3 となっている。表 1-2-3 に VOC 発生源と主な材料，表 1-2-4 に材料から発生する VOC を示す。

化学物質の人に対する影響は曝露濃度と曝露時間によって異なるが，急性毒性，亜急性毒性，慢性毒性等に分けられる。しかし，シックビルディングシンドローム等で問題となる VOC 濃度は極めて低濃度であり，かつ複合曝露で起こることから人に対する影響も解明しにくい状況であった。しかし，近年臨床環境医学の発達により，低濃度曝露の人に対する影響も明らかになりつつある。

VOC の作用機構は，中枢神経，特に免疫系や他の気管系にいろいろな方法で二次的に影響を及ぼす大脳辺縁系に関連した症状であるとされている。具体的には，記憶困難，集中力欠如，下痢，便秘等の自律神経系の機能異常，また恐怖感，孤独感の助長，肩こり，冷え性，頭痛，めまい，吐き気，疲労感等の症状が報告されている。表 1-2-5 に化学物質過敏症の主な症状を示す。

表 1-2-1　VOCの分類と化学物質の例

名称	沸点（℃）	例
超揮発性有機化合物（VVOC）	<0～50-100	ホルムアルデヒド
揮発性有機化合物（VOC）	50-100～240-260	トルエン，ベンゼン，キシレン，スチレン
半揮発性有機化合物（SVOC）	240-260～380-400	フタル酸ジオクチル，リン酸トリブチル
粒子状物質（POM）	>380	クロピリホス，ホキシム，ピリンフェンチオ

表 1-2-2　VOCの長期低濃度曝露に関するガイドライン

VOCの分類	濃度（mg/m^3）	備考
アルカン類	0.100	個々の化学物質の濃度は，属する属性の全濃度の50%を越えないこと。またTVOC濃度の10%を越えてもならない。
芳香族炭化水素	0.050	
テルペン類	0.030	
ハロカーボン類	0.030	
エステル類	0.020	
アルデヒド・ケトン類	0.020	
その他	0.050	
TVOC（総計）	0.300	

表 1-2-5　化学物質過敏症の主症状

自律神経障害	発汗異常，手足の冷え，頭痛，易疲労性
精神障害	不眠，不安，鬱状態，不定愁訴
気道障害	咽頭痛，口渇
消化器障害	下痢，便秘，悪心
眼科的障害	結膜の刺激障害，調節障害，視力障害
内耳障害	めまい，ふらつき，耳鳴り
運動器障害	能力低下，筋肉痛，関節痛，振せん
循環器障害	動悸，不整脈，循環障害
免疫障害	皮膚炎，喘息，自己免疫異常

表 1-2-3　VOC の発生源と主な材料

発生源の種類	主な材料
建材	パーティクルボード（接着剤） 化粧板（接着剤，原料） 壁紙（接着剤，可塑剤） 断熱材；発砲尿素樹脂（発泡材） 尿素樹脂バインダーガラス繊維（接着 シール剤（有機溶剤） プラスチック配管（原料，可塑剤） 塗料（有機溶剤，原料） 澱粉糊（防カビ剤） 合成接着剤（有機溶剤，原料）
家具・調度品	カーペット（接着剤，原料） タンス（接着剤，防虫剤，原料） カーテン（難燃剤）
暖房・厨房機器	開放型石油ストーブ ガスレンジ（燃料，燃焼生成物） システムキッチン（原料，接着剤）
空調機器	空調システムのダクト内壁
日用品	化粧品 事務用品 接着剤 芳香剤，消臭剤 滅菌剤
電化製品・事務機器	掃除機（防菌剤，防虫剤） コピー機 マーカー（有機溶剤）
自動車関連	燃料 排ガス 内装剤

表 1-2-4　材料と発生する VOC の例

材料	発生するVOCの例
有機溶剤	トルエン キシレン ヘプタン アルコール類 メチルエチルケトン 酢酸エチル ブチルエーテル ブチルアルコール
殺虫剤・防蟻剤	ケロシン クロロピリフォス アレスリン ペルメトリン フェニトロチオン ダイアジノン
防菌・防カビ	チアベンダゾール（TBZ） p-クロロメタキシレノール イソプロピルメチルフェノール ホルムアルデヒド
防ダニ・防虫剤	ヒノキチオール フェニトロチオン フェンチオン TBZ p-ジクロロベンゼン ナフタレン アレスリン
芳香剤・消臭剤	リモネン α-ピネン p-ジクロロベンゼン 植物抽出油
清掃剤・ワックス	エタノール デカン トルエン キシレン
接着剤	ホルムアルデヒド トルエン キシレン トリメチルベンゼン ヘキサン アルコール類 アセトン メチルエチルケトン
難燃剤	リン酸トリブチル トリスリン酸クロロエチル
可塑剤	フタル酸ジブチル フタル酸ジエチルヘキシル

1-2-2 汚染物質の発生機構

(1) レーザー（電子写真式）プリンタ[9)10)]

コピー機などと同様の電子写真を用いた印刷方式のうち，レーザーにより帯電ドラムにイメージを描画する方式のプリンタは，高速・高解像度ページプリンタの主流である。帯電ドラムには光を当てることで電荷が変化する素材を使用し，この帯電ドラムにあらかじめ電荷を与えておいて，レーザーでドラム上に印字イメージを描画する。これにより帯電ドラム上には，マイナスに帯電した部分と，レーザーで描画されたことによりプラスに帯電した部分とに分かれる。これに，トナーと呼ばれる細かい炭素の粉末を，マイナスに帯電させることで付着させ，紙に転写，熱と圧力を加えて紙に定着させることで印刷を行う。逆に，最初にトナーをドラム全体に付着させておき，不必要な部分にレーザーを当ててトナーを付けないようにする方式もある。それぞれ白と黒の発色特性がよくなるという特徴がある。

帯電ドラムをコロナ放電で帯電する際に，空気中の酸素と反応してオゾンが発生する。また，色剤を紙に熱圧着させるためにトナー中の樹脂に含まれているスチレンの他に，ケーシングからも熱によって VOC が出る可能性がある。粒子に関しては，トナーが機械的ストレスにより粉砕されて微小化することや，何らかのガス状物質が水分等と反応して粒子化することが考えられる。さらに，トナー自体は 10μm 程度の大きさだが，印字性能の高度化で微小化する傾向にある。図 1-2-1 にレーザープリンタの印字機構を示す。

(2) インクジェットプリンタ[11)]

インクを熱または圧力で紙に噴射して印字するタイプのプリンタ。カラー化が容易なことから，最近ではカラーインクジェットが主流になりつつある。具体的な印字方式は，ベンダによってさまざまである。たとえば熱による膨張を利用してインクを噴射するサーマルインクジェット方式（TIJ 方式），素子による圧力を利用するピエ

ゾ方式などである。TIJ 方式の代表例はキヤノン社のバブルジェット方式で，他にヒューレット・パッカード，ゼロックス，レックスマーク，ブラザー，オリベッティーなどが採用している。一方ピエゾ方式はセイコーエプソン社が採用している。図 2－2－2 にインクジェットプリンタの印字機構を示す。

レーザープリンタが主に乾式の粉体インクを使用するのに対し，インクジェットプリンタは液体インクを使用する点が最大の違いである。放電を用いないのでオゾンは発生せず，熱も比較的発生しない。しかし，インクを紙に吹き付ける時に定着しなかったインクが飛散する点で問題がある。この粒子の径は印字方式によって異なると考えられるが，サーマルインクジェット方式プリンタでは 0.1μm 以下という報告がある。インクは重金属等の有害物質を含んでおり，またインクから VOC が揮発することも考えられる。

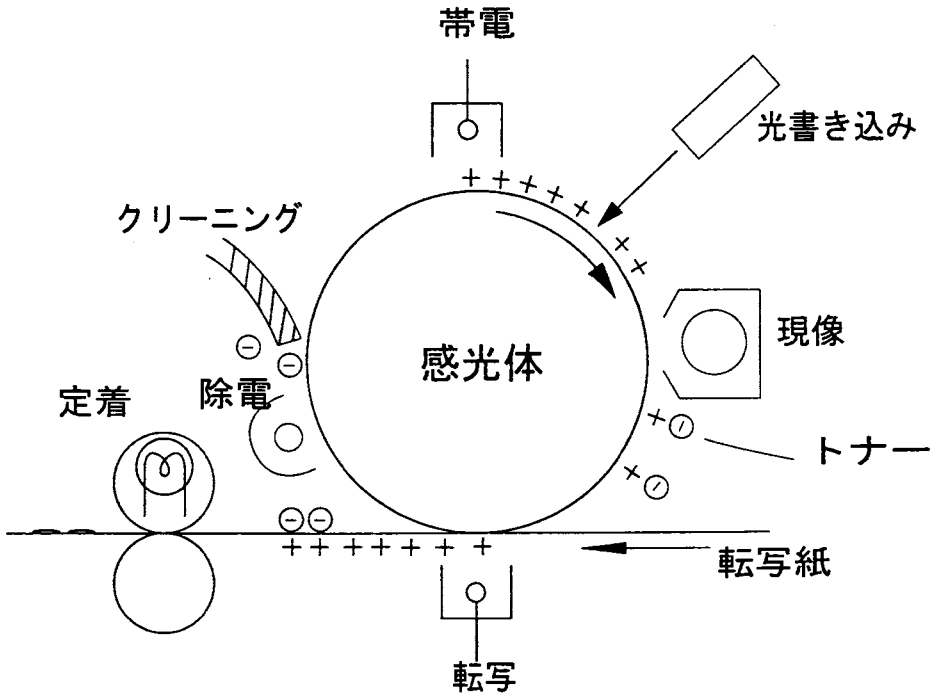


図 1-2-1　レーザープリンタの印字機構

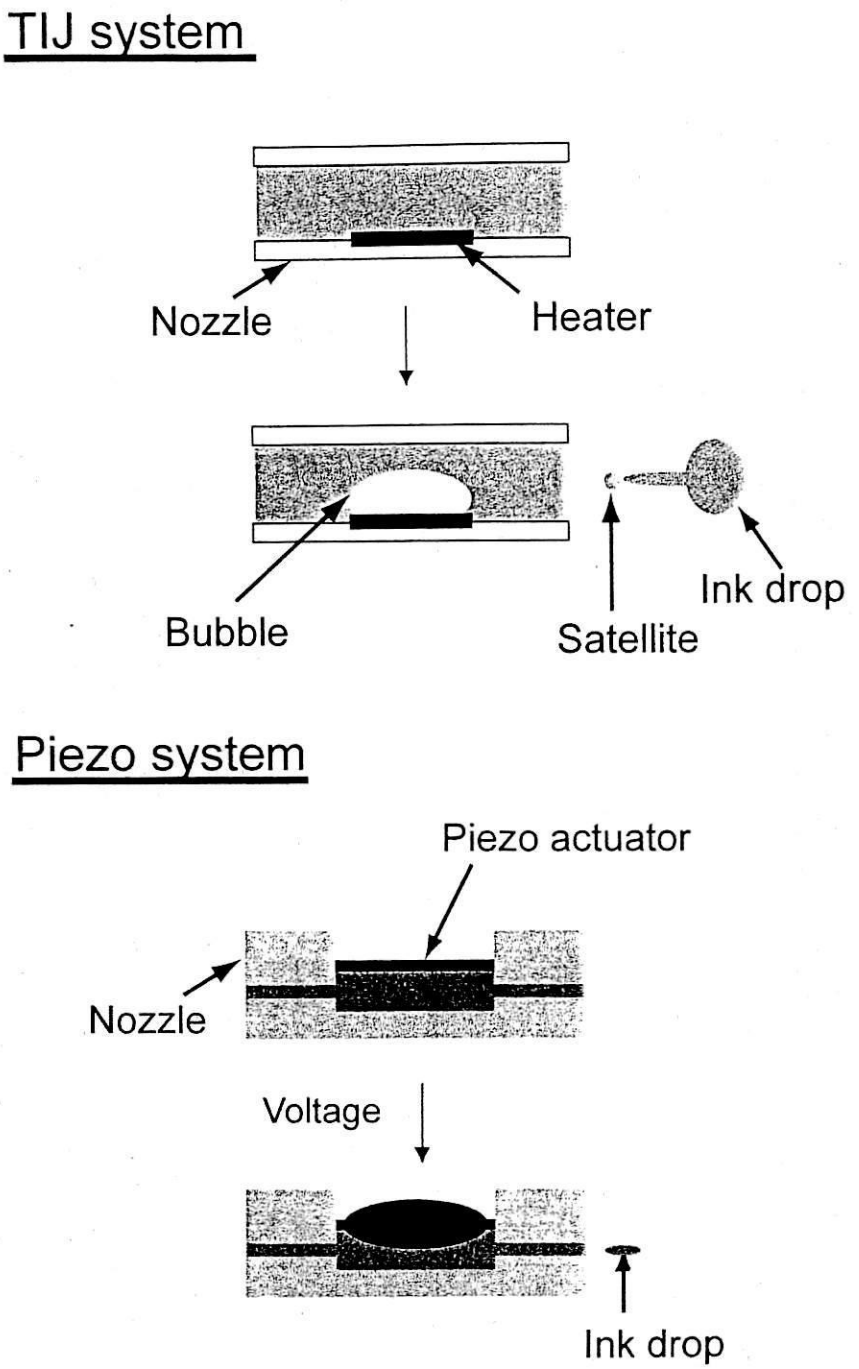


図 1-2-2　インクジェットプリンタ

1-3　汚染物質の測定方法

1-3-1　オゾンの測定方法 [12)]

オゾン濃度の測定には，オゾンが紫外線を吸収する性質を利用した測定器（UV 光度オゾン分析計，サーモエレクトロン：49C）を用いた。オゾン濃度は，ランバート・ベールの法則により説明されるように，254nm の波長の UV 光線の吸光度 A に正比例する。

$$A=-\ln(I/I_0)=KLC$$

K:分子吸収係数，308cm^{-1}（0℃，1気圧）

L:セルの長さ，38cm

C:オゾン濃度（ppm）

I:オゾンを含むサンプルのUV光線の濃度（サンプルガス）

I_0:オゾンを含まないサンプルのUV光線の光度（リファレンスガス）

サンプルガスは，図1-3-1に示されるようにサンプルバルクヘッドを通じて測定器に導入され，2本のガス流れに分割される。一方のガス流れは，オゾンスクラバーを貫流しレファレンスガス（I_0）になる。その後，リファレンスガスはレファレンスソレノイドバルブに流れ，サンプルガスは直接サンプルソレノイドバルブに流れる。サンプルソレノイドバルブは，レファレンスガス流れとサンプルガス流を10秒ごとにセルAとセルBに交互に流す。

各セルのUV光線の強度は，検出器AとBにより測定される。各セルのオゾン濃度を計算し，フロントパネルディスプレイとアナログ出力に平均濃度が出力される。計測器は1.33 L/minで吸気し，10秒ごとに濃度を表示するが，今回はコンピュータで1分間の平均値を記録して経時変化をみた。

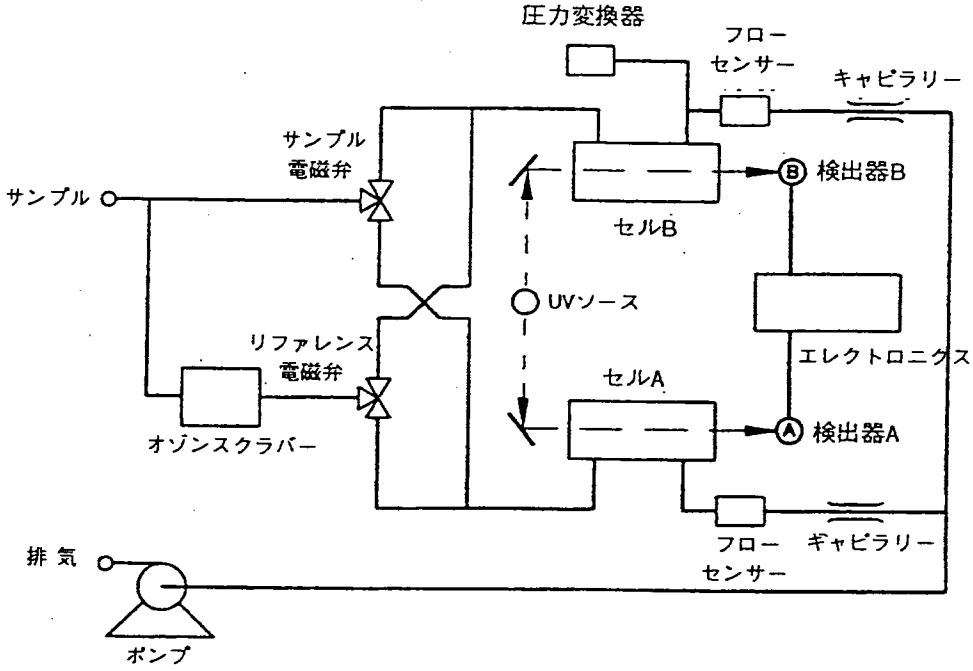


図 1-3-1　オゾン分析器フロー概要図

1-3-2　粒子の測定方法 [13)]

粒子の測定は，粒径分布と個数濃度の測定に分かれる。これらの計測には，SMPS（Scanning Mobility Particle Sizer, 走査型モビリティ粒径分析器）を用いた。SMPS は DMA（Differential Mobility Analyzer, 微分型静電分級器）と CNC（Condensation Nucleus Counter, 凝縮粒子計測器）を組み合わせたものである。この装置では，スキャニング法を用いることにより 30～300 秒で粒径分布の測定ができる。スキャニング法とは電圧を 30～80 秒の間に時間に対し指数関数的に増加あるいは減少させ，そのときの分級粒子の濃度を連続測定し短時間で粒径分布を得る方法である。粒子数の測定は，DMA で分級された粒子が CNC に吸引されて行われる。CNC では，過飽和状態の作用液体（ブタノールなど）の凝縮作用

により粒径を大きくし，光学セルの中で散乱光測定により個数濃度を得る。図 1-3-2 に SMPS の概略図を示す。

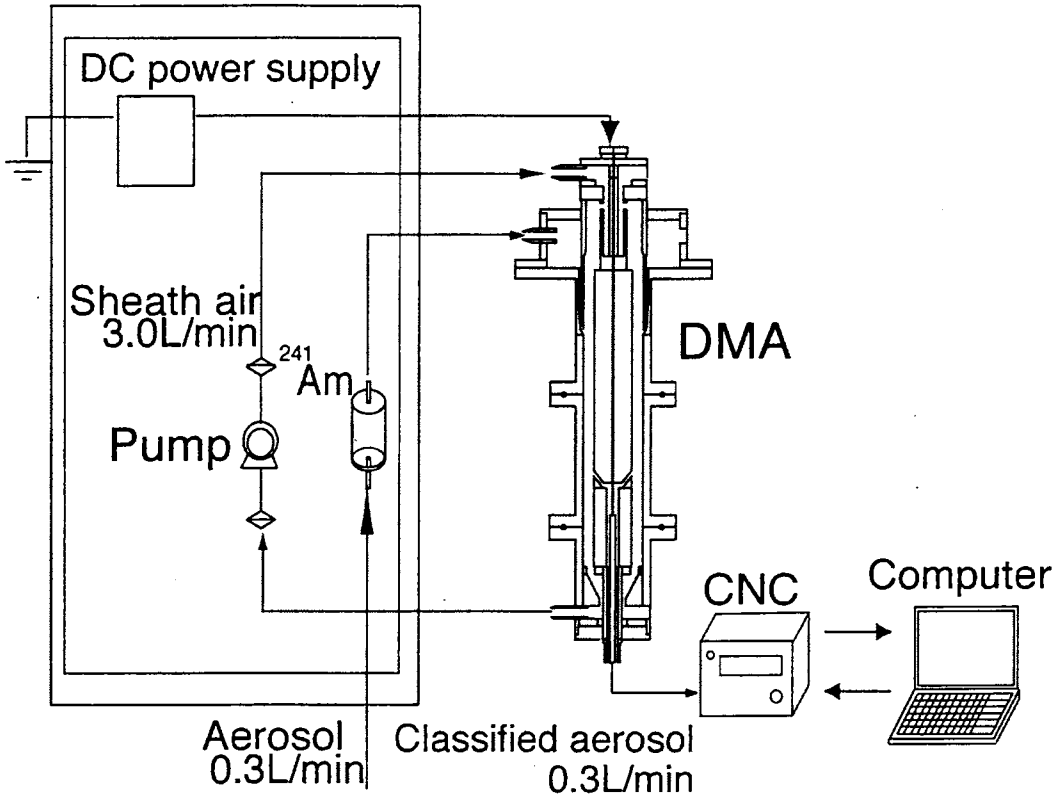


図 1-3-2　SMPS の概略図

1-3-3　VOC の測定方法 [14]

VOC を測定するための手順は，試料の捕集，分析のための前処理操作，分析という流れで進行する。分析にはガスクロマトグラフ（GC）もしくはガスクロマトグラフ質量分析計（GC/MS）を使用することが一般的である。最初の試料捕集にはいくつかの方法がある。環境中の VOC の捕集方法としては，キャニスター（内部を清浄にした可搬型ステンレス鋼製容器）による直接捕集法と吸着剤を用いた固体吸着法に集約される。しかし，前者は容器内面への吸着ロスの問題や自動分析ができない点があり，後者は捕集過程での共存物質の影響，脱着時の artifact（クロマトデータ上の原因不明のピーク）の出現など，問題点を指摘する報告もあり，十分確

立した方法と言える段階には至っていない。また，どちらの方法で行うかによって，次の前処理操作方法が異なってくる。

本研究で用いた固体吸着法は，吸着剤を捕集管に充填して試料を濃縮捕集する方法で，携帯性やコストの面で優れているため汎用されている方法である。ポンプで所定量の空気を採取する方法および拡散による吸着を利用した方法がある。ポンプを用いる捕集方法はアクティブサンプリングと呼ばれ，測定時間における平均濃度を直接かつ正確に用いることができる。拡散と吸着剤への吸着を利用した方法はパッシブサンプリングと呼ばれ，動力を必要とせず，簡易的に間接的な値ではあるが，平均濃度を求めることが可能である。

吸着剤には，無機質，有機質のものを含め，各種の化学的組成のものがある。また，化学的組成が同一であっても物理的特性の異なる多種多様なものが存在する。固体補集法に主に用いられる吸着剤としては，ポーラスポリマー系，ゼオライト系，炭素系などがあり，特にポーラスポリマー系の Tenax 剤が汎用されている。

アクティブサンプリングは，基本的に吸引ポンプと流量計が主要な装置であり，捕集管は装置系の先端部に装着する。本研究では Tenax 剤を用いてアクティブサンプリングで捕集した。

捕集した VOC の分析には，GC/MS（Gas Chromatograph/Mass Spectrometer, SHIMADZU:17A, QP5050A）を用いた。分析は以下の手順で行った。GC 部において捕集された VOC を脱着させ，熱によって各成分を気化させた。次に，カラムで各成分を分離した。この時の分離するまでの時間（保持時間）が各物質によって異なるため，これを調べて各物質名を特定できる。次に，ＭＳ部において試料分子はイオン化され，均一な磁場を有する質量分離室に入る。ここで，各イオンは磁場により質量に応じてその方向を曲げられ，分離され検出され

る。図 1-3-3 に GC/MS の概略図を示す。

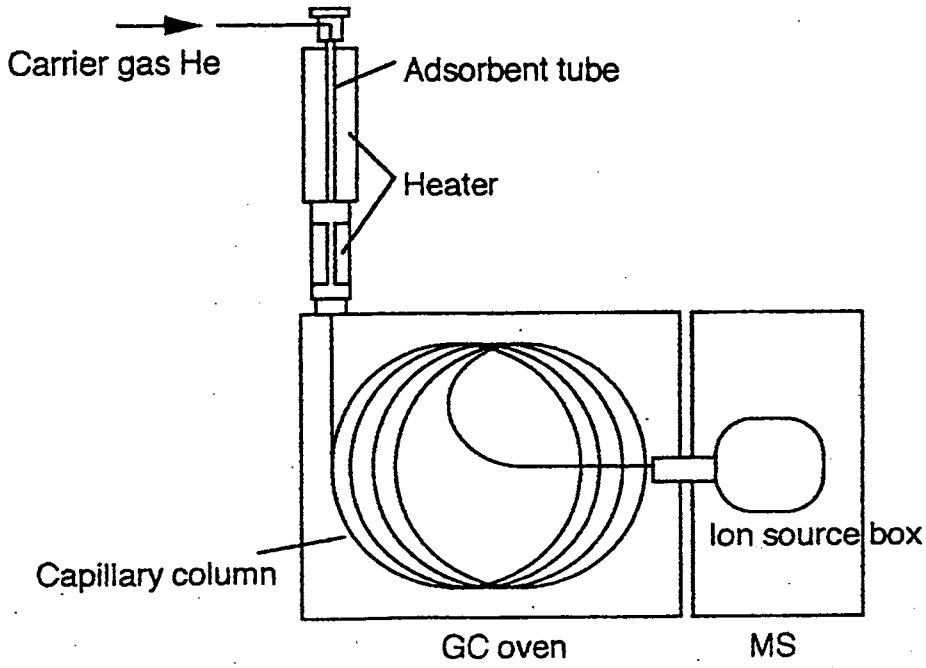


図 1-3-3　GC/MS の概要

第２章　プリンタの存在する室内空気質の実測

実際の建築空間においてプリンタの運転の室内空気質に及ぼす影響をみるために実測を行った。以下にその概要と結果を記す。

2-1　実測方法 [15)16)]

実測対象として大学の会議室を選んだ。この会議室は 6m×6m×3m の大きさで，床はフローリング張り，家具としては机と椅子と本棚があり，西面のみに窓がある。

実測は，会議室の中央の机の上にプリンタを設置し，その周辺に測定機器を置いて行った。図 2-1-1 に示した概略のように，３つのポイントでオゾン，粒子，ＶＯＣ濃度の経時変化を測定した。Point1 はプリンタの上部で，床上 150cm の点であり，Point2 はプリンタの排気口近傍，Point3 は Point1 から 150cm 水平方向に離れた点である。

実測中は，エアコンと換気扇を運転して温度を 25℃に設定し，換気回数は 2.1 回/h であった。表 2-1-1 に試験体の概要を，表 2-1-2 に測定機器を示す。

実測の手順は，図 2-1-2 に示すように，プリンタの電源を ON にした状態でアイドリングを 20 分間行った後，30 分間の標準テキストの印刷を行い，その後再び 20 分間のアイドリングとなっている。また，実測の前に予備実験として室内のバックグラウンドを測定した。図 2-1-3 に粒径分布，図 2-1-4 にクロマトグラフ，表 2-1-3 に各ＶＯＣ濃度を記す。オゾン濃度については，測定日の気候条件によって変動したので省略する。実測は外気オゾン濃度の変化の影響を受けないように夜間に行った。

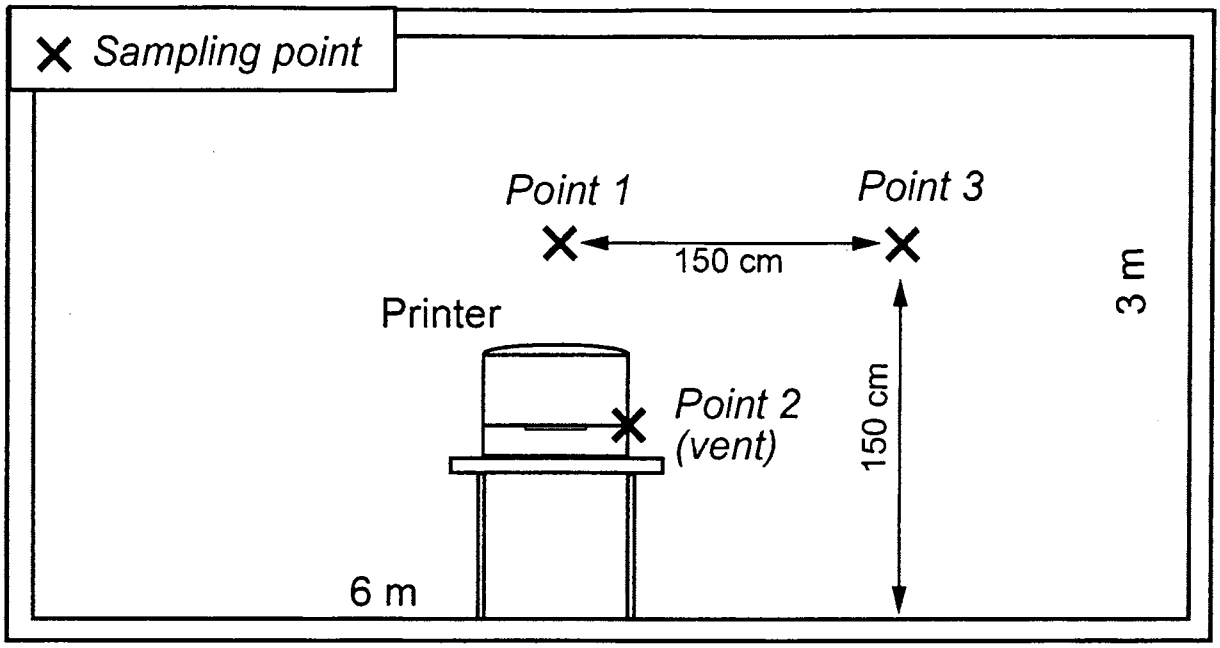


図 2-1-1　実測の概要

表 2-1-1　試験体の概要

試験体名	機種	印字方式	製造年
Printer1	hp LaserJet 4100	乾式電子写真方式	2001
Printer2	Cannon LBP-2510	半導体レーザ＋乾式電子写真方式	2002
Printer3	Cannon BJ F9000	シリアルバブルジェット方式	2001

表 2－1－2　測定機器

測定項目	測定機器
オゾン	O_3 Analyzer （日本サーモエレクトロン：49c）
粒子	Condensation Particle Counter (TSI: 3022A) Electrostatic Classifier (TSI: 3080)
VOC	捕集：Tenax GR（0.5 L/min で 10 L） 分析：GC/MS（SHIMADZU:17A, QP5050A）

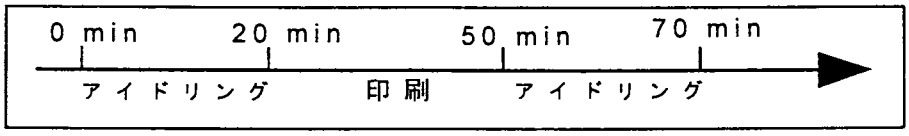


図 2-1-2　実測タイムスケジュール

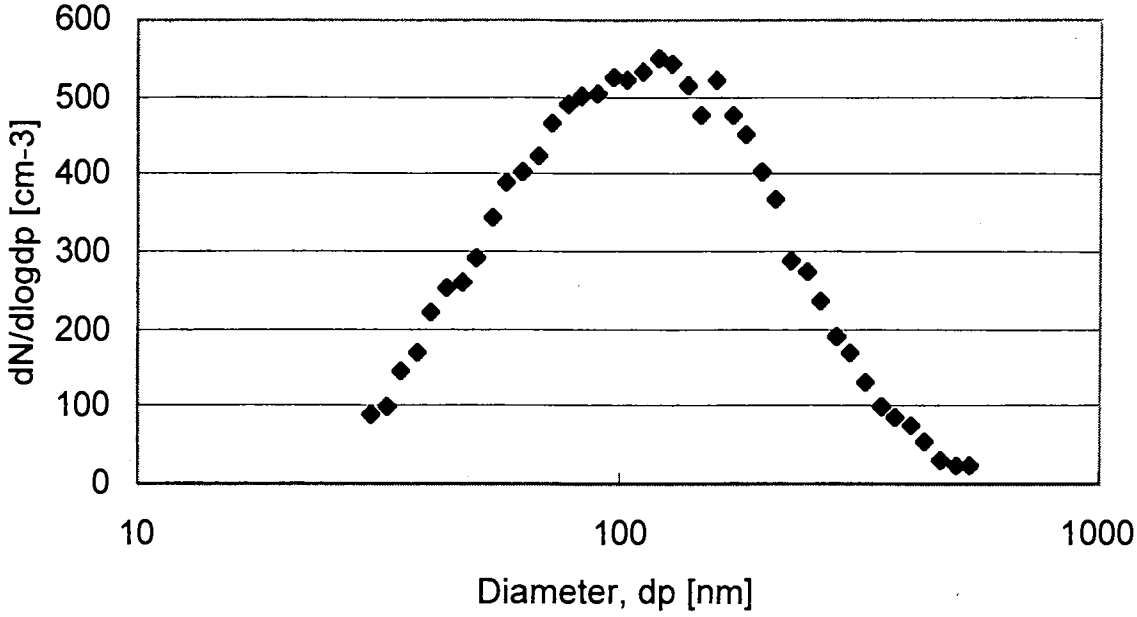


図 2-1-3　会議室中の大気塵のバックグラウンドの粒径分布

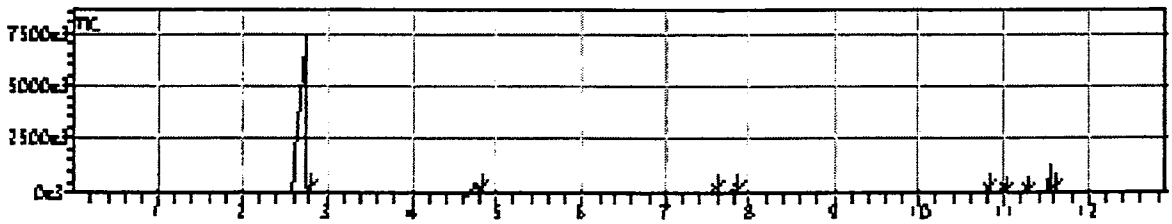


図 2-1-4　会議室内空気の VOC のクロマトグラフ

表 2-1-3　バックグラウンドの各ＶＯＣ濃度

化合物名	濃度（μg/m³）
1-Butanol	1270
Toluene	56.1
Ethylbenzene	9.95
Benzene, 1,2-dimethyl-	14.4
Benzene, 1,2,3-trimethyl-	6.40
Benzene, 1,4-dichloro-	11.6
Decane	5.69
1-Hexanol, 2-ethyl-	66.6

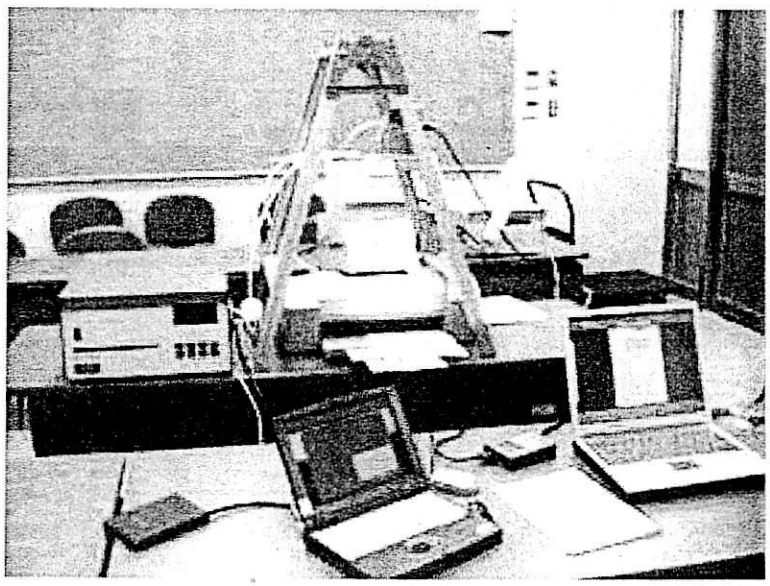


写真 2-1 実測の様子

2-2 実測の結果

2-2-1 微粒子

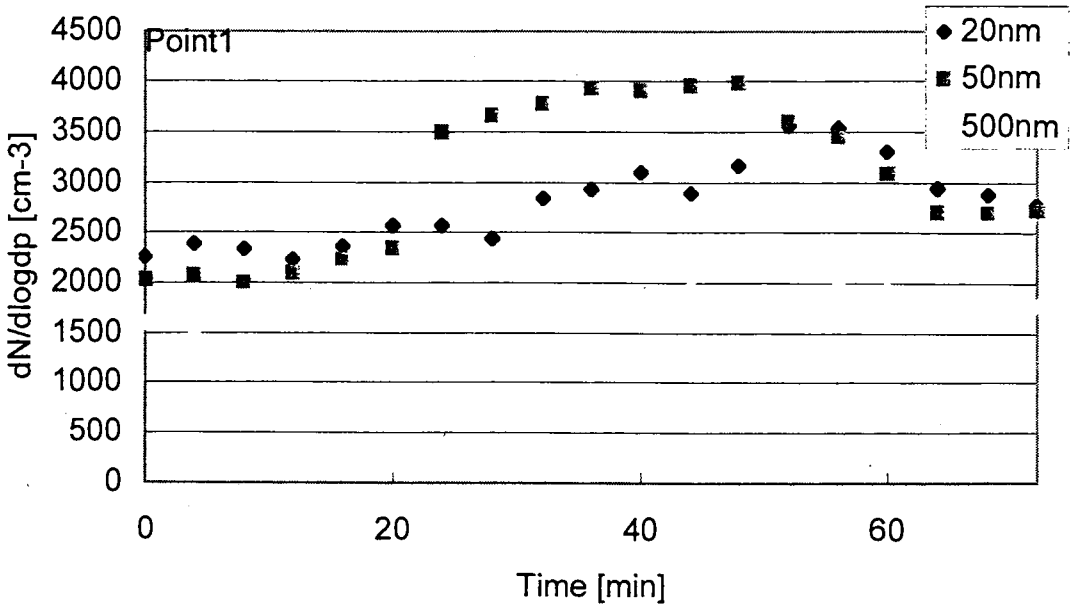
図 2-2-1, 3, 5 に, Printer1, 2, 3 の Point ごとの粒径別の個数濃度の経時変化を示す。個数濃度は, 全粒径の合計と, 20nm, 50nm, 500nm の粒径について示す。また, 図 2-2-2, 4, 6 に, Printer1, 2, 3 の Point ごとの時刻別の粒径分布を示す。図は, 実測開始から 8 分後（アイドリング中), 36 分後（プリント中), 60 分後（アイドリング中）の結果を示す。ただし, Printer3 には排気口がないので Point2 では測定しなかった。

2-2-2 オゾン

図 2-2-7 に, Printer ごとのオゾン濃度の経時変化を示す。なお, Printer3 には排気口がないので Point2 では測定しなかった。

2-2-3 VOC

VOC については, 定性・定量分析の結果からバックグラウンドとノイズを除いて, 有意な濃度変化がみられた物質について示した。Printer1 と Printer2 の各 VOC の濃度経時変化を図 2-2-8, 9 に示す。なお, Printer3 からはバックグラウンド以外の VOC を測定することはできなかった。



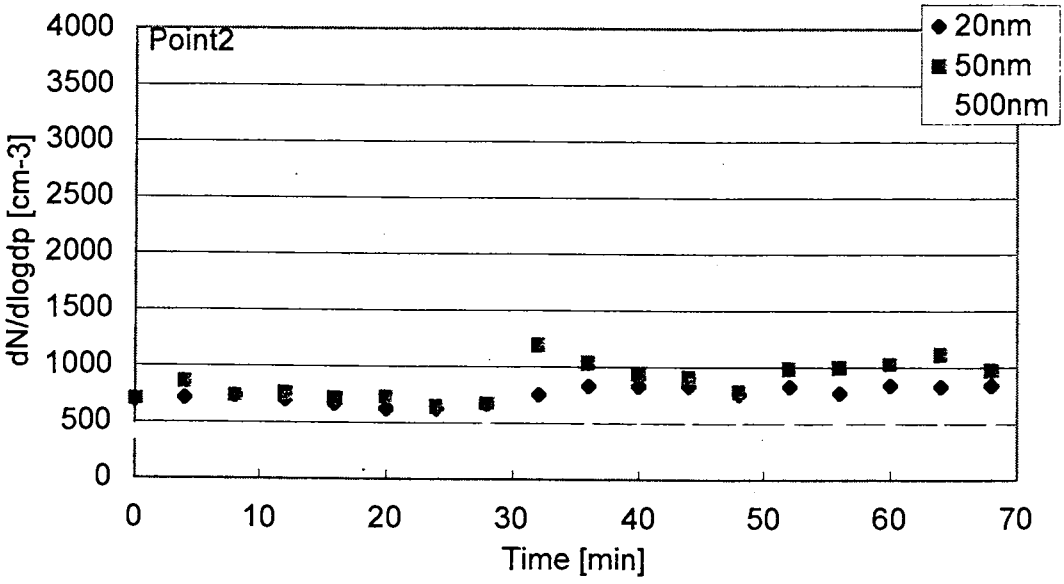


図 2-2-1　Printer1 の粒径別の個数濃度の経時変化

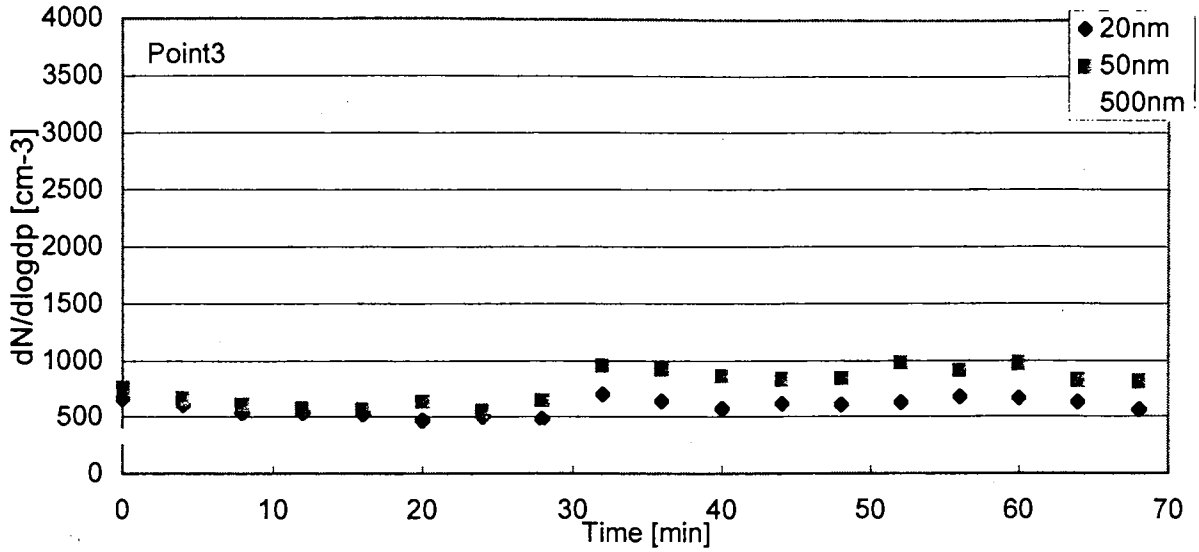


図 2-2-1　Printer1 の粒径別の個数濃度経時変化（つづき）

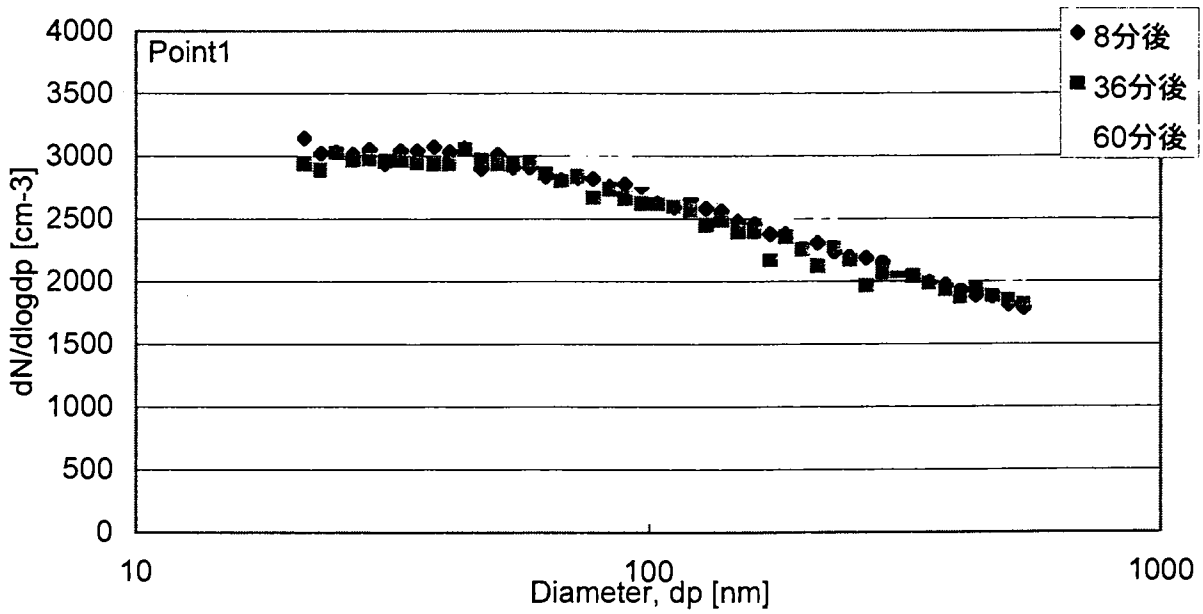
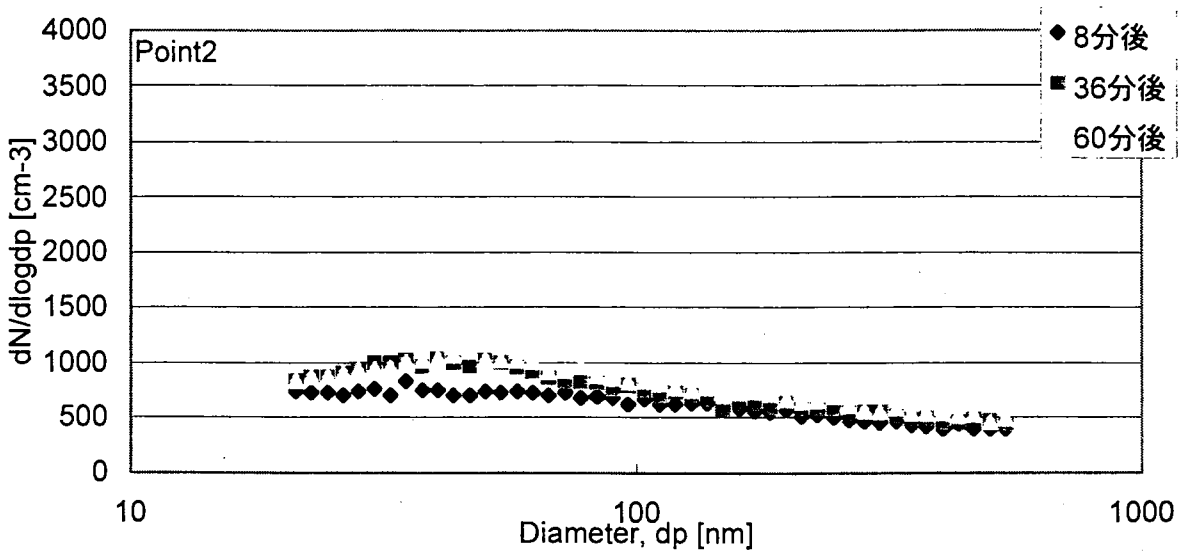


図 2-2-2　Printer1 の時刻別の粒径分布



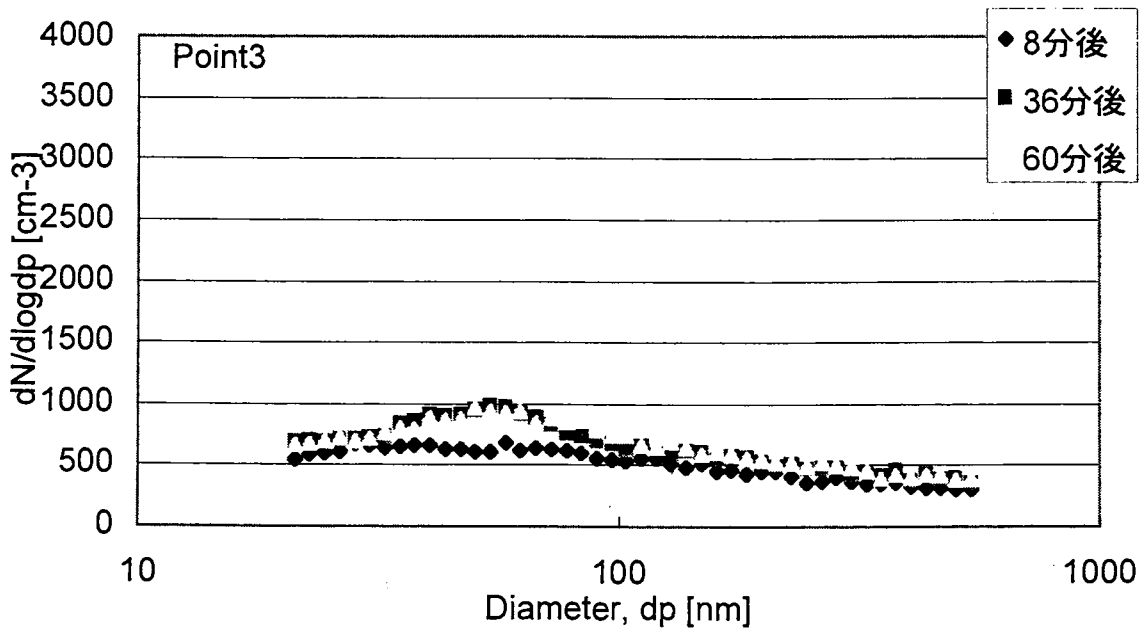
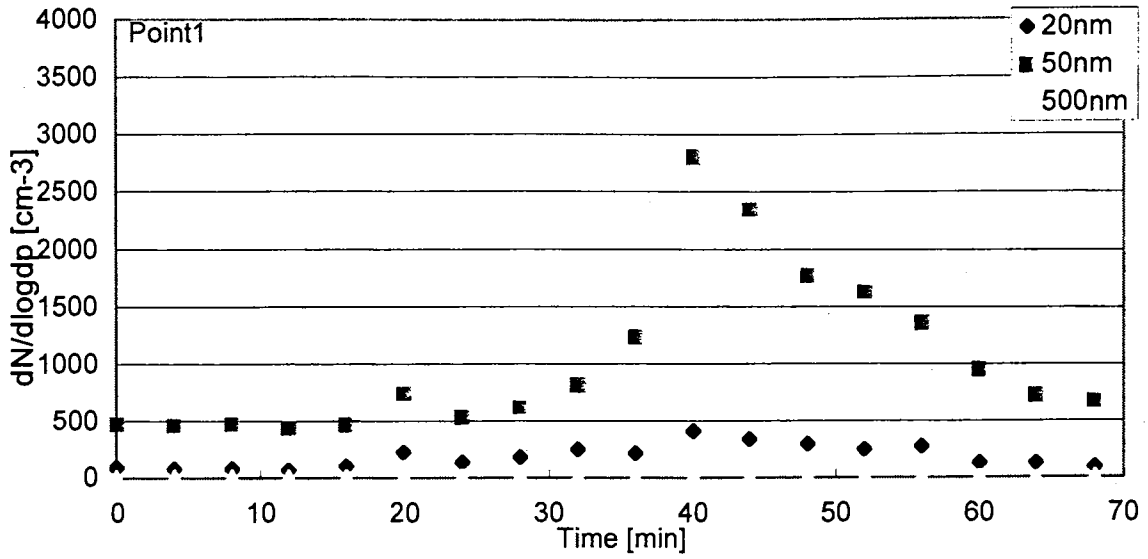


図 2-2-3　Printer1 の時刻別の粒径分布（つづき）



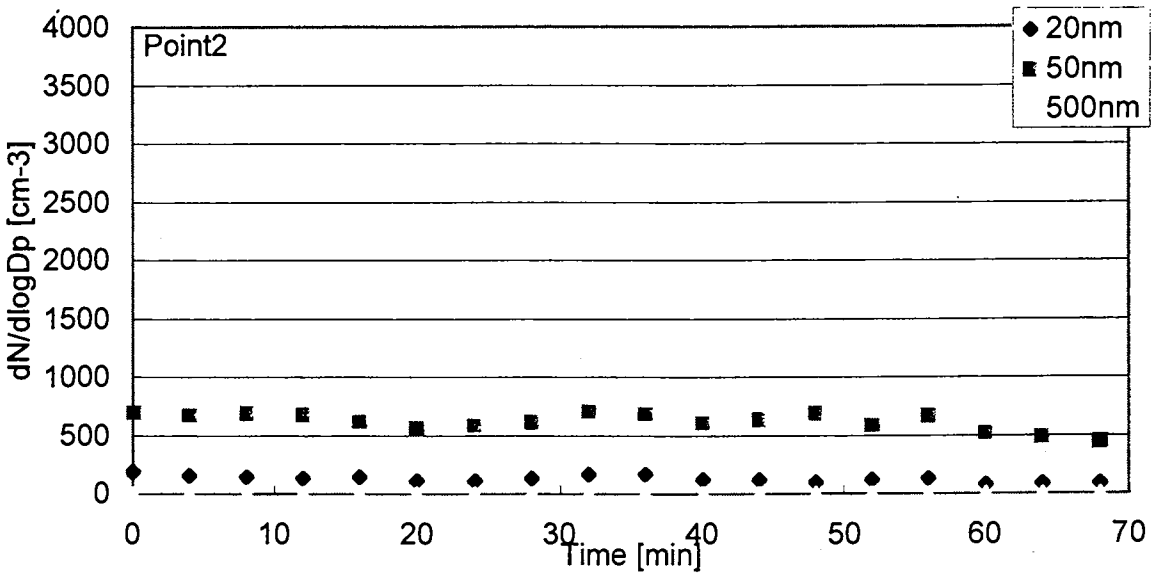


図 2-2-3　Printer2 の粒径別の個数濃度の経時変化

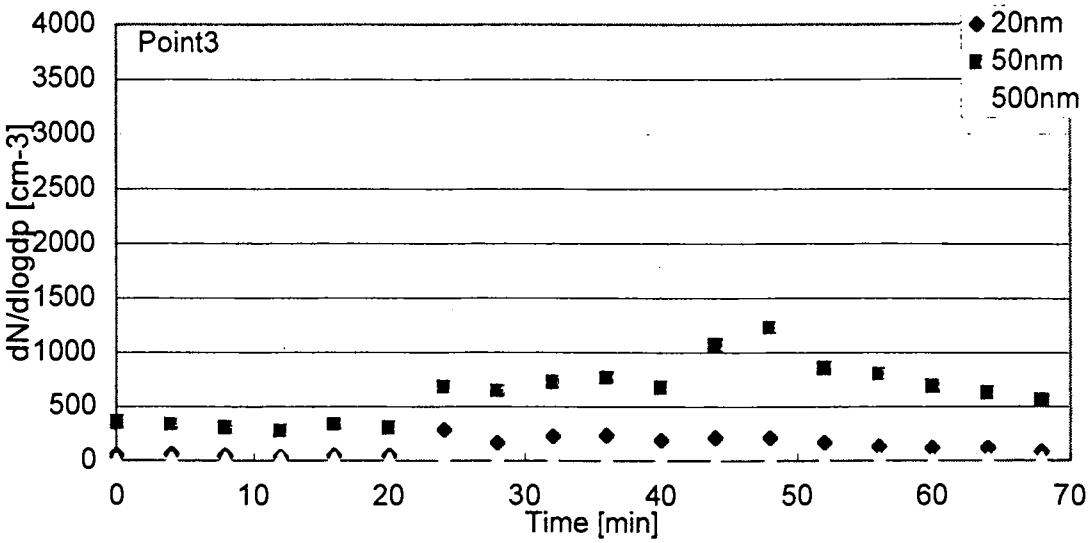
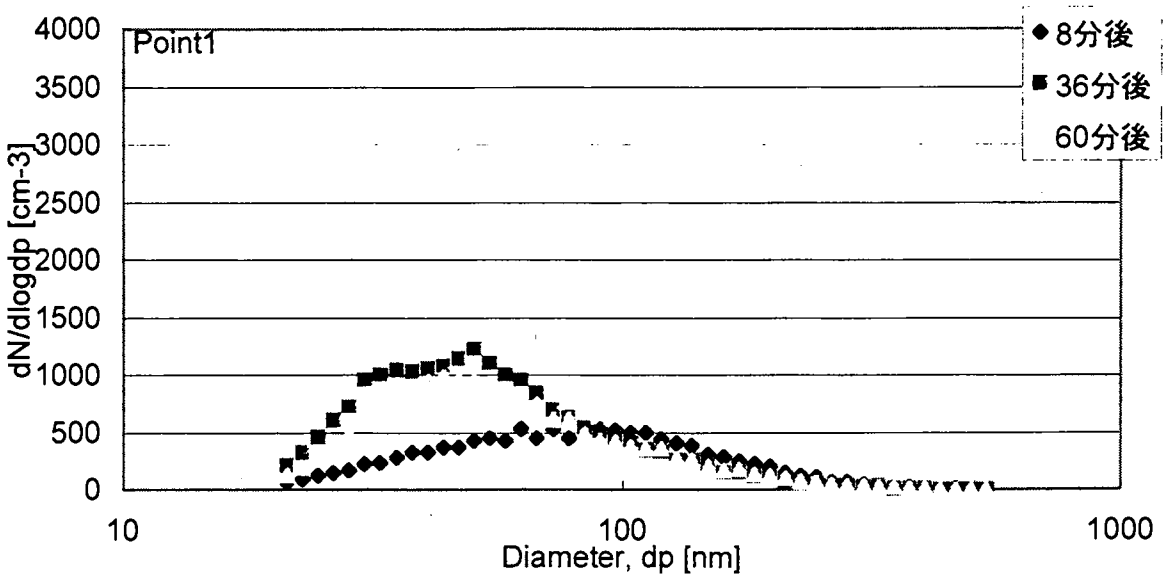


図 2-2-3　Printer2 の粒径別の個数濃度の経時変化（つづき）



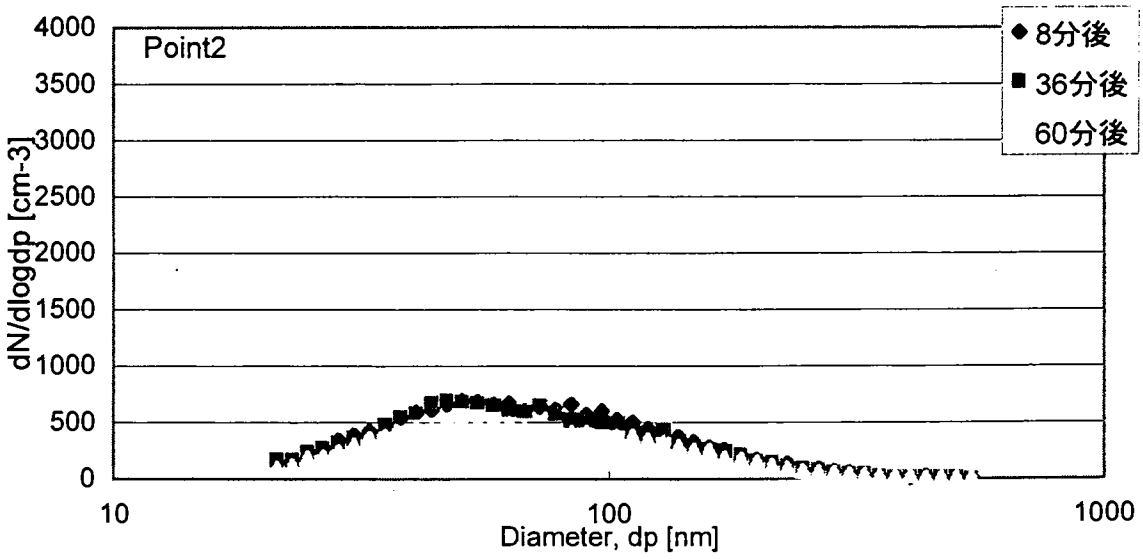


図 2-2-4　Printer2 の時刻別の粒径分布

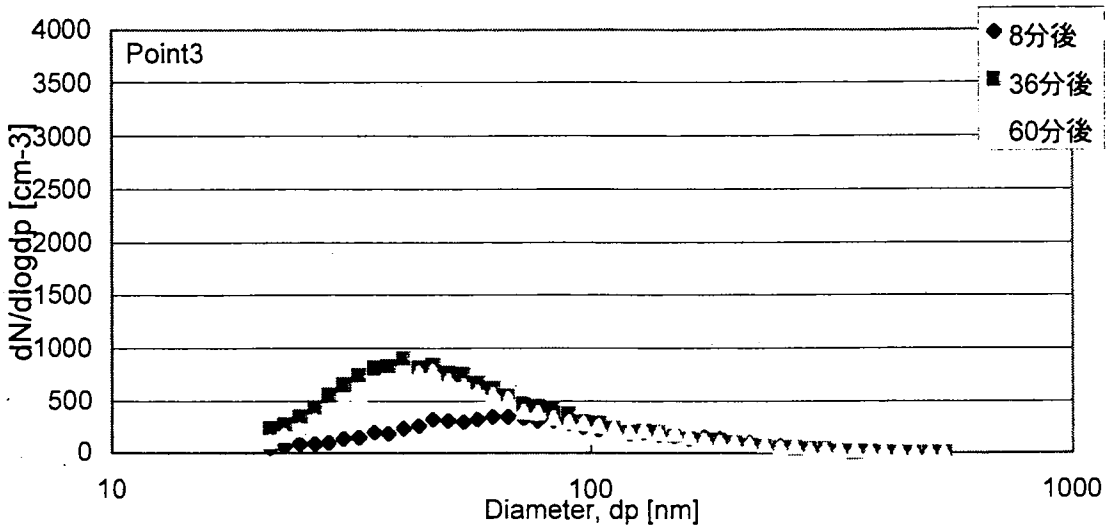
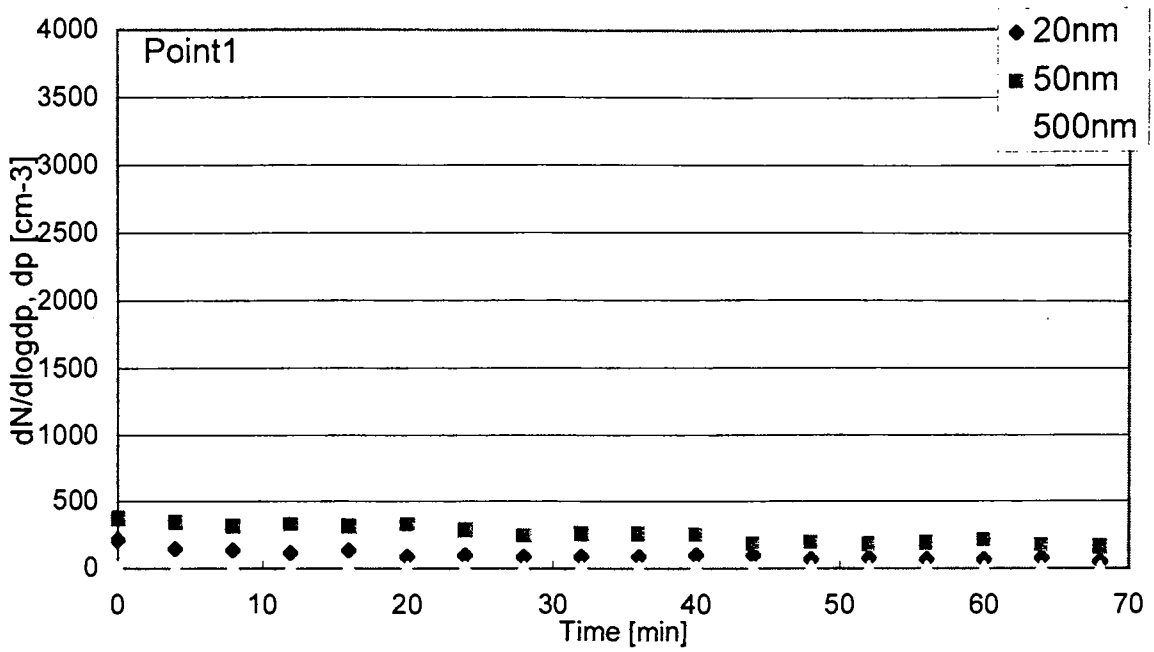


図 2-2-4　Printer2 の時刻別の粒径分布（つづき）



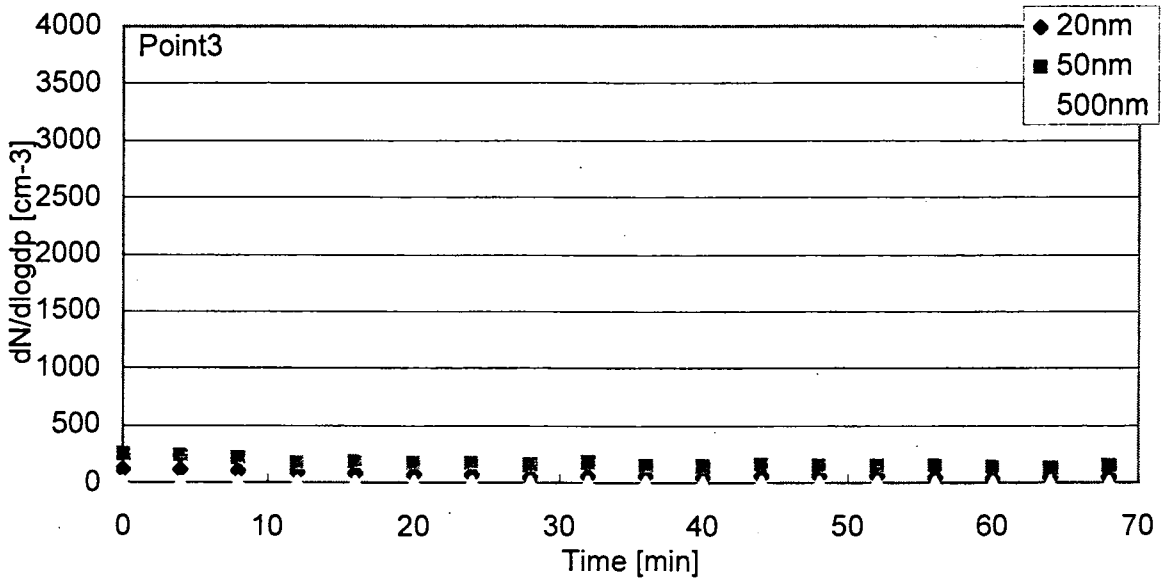
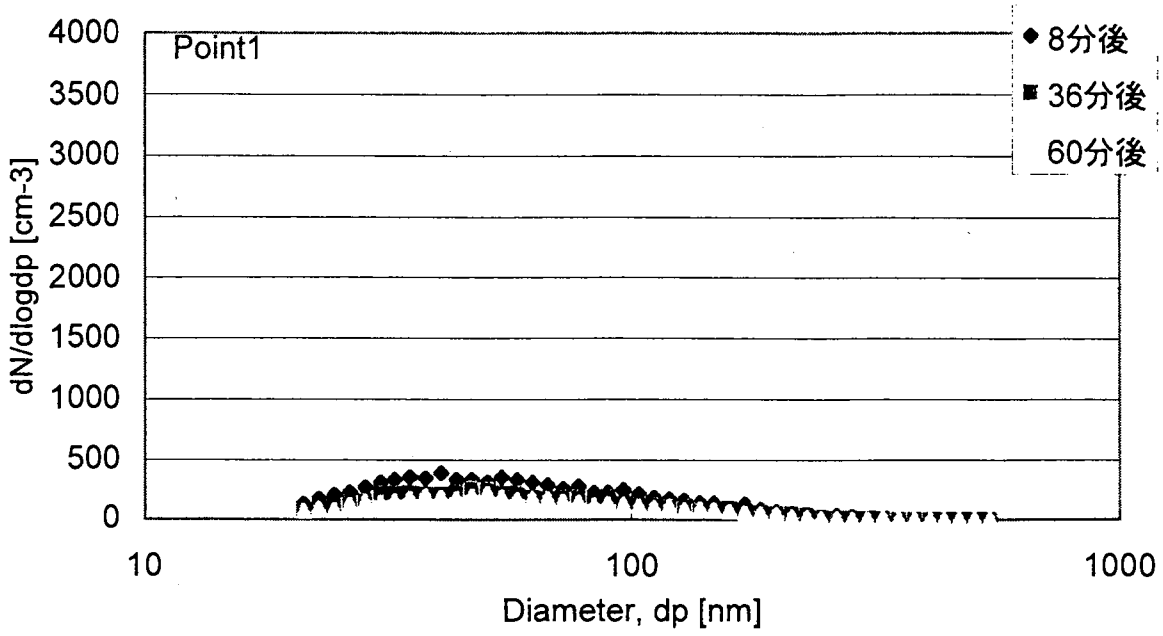


図 2-2-5　Printer3 の粒径別の個数濃度の経時変化



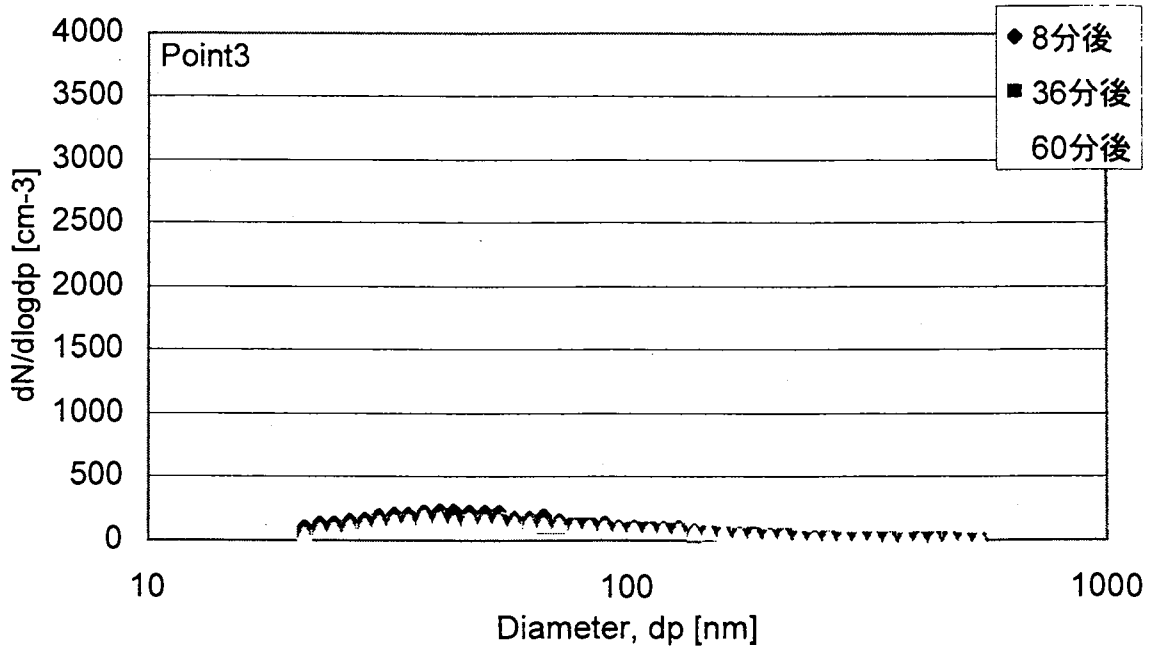
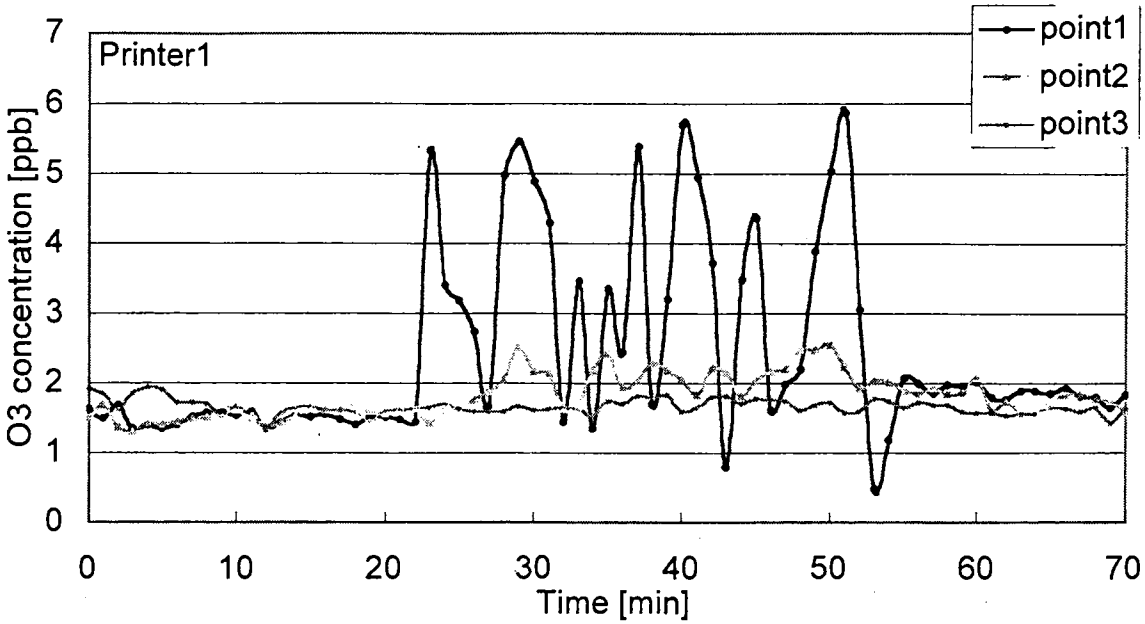


図 2-2-6　Printer3 の時刻別の粒径分布



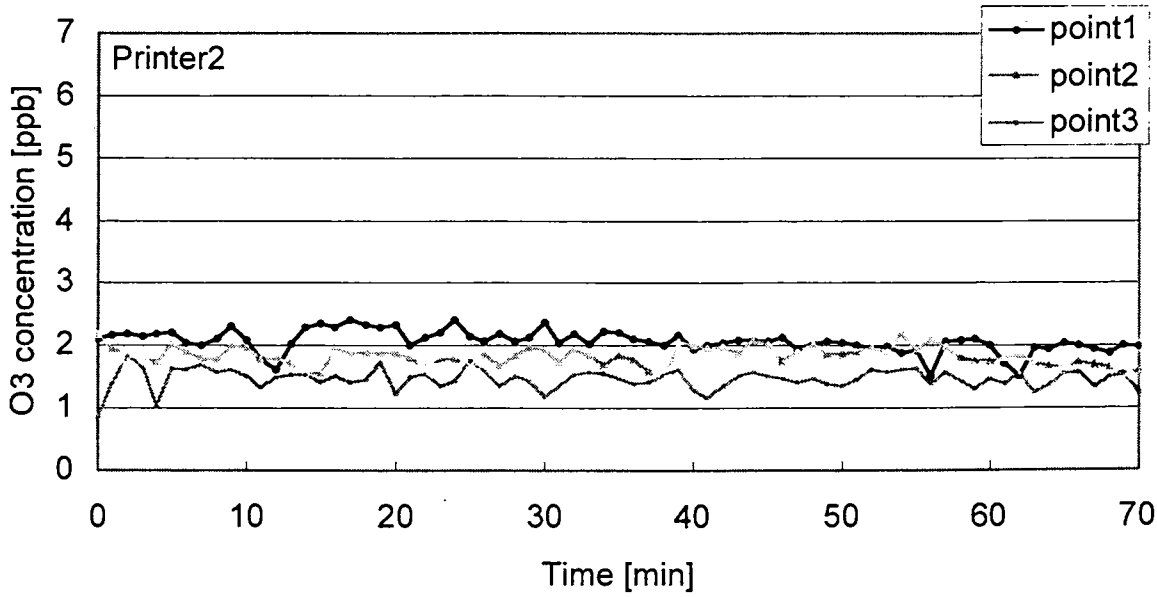


図 2-2-7　オゾン濃度の経時変化

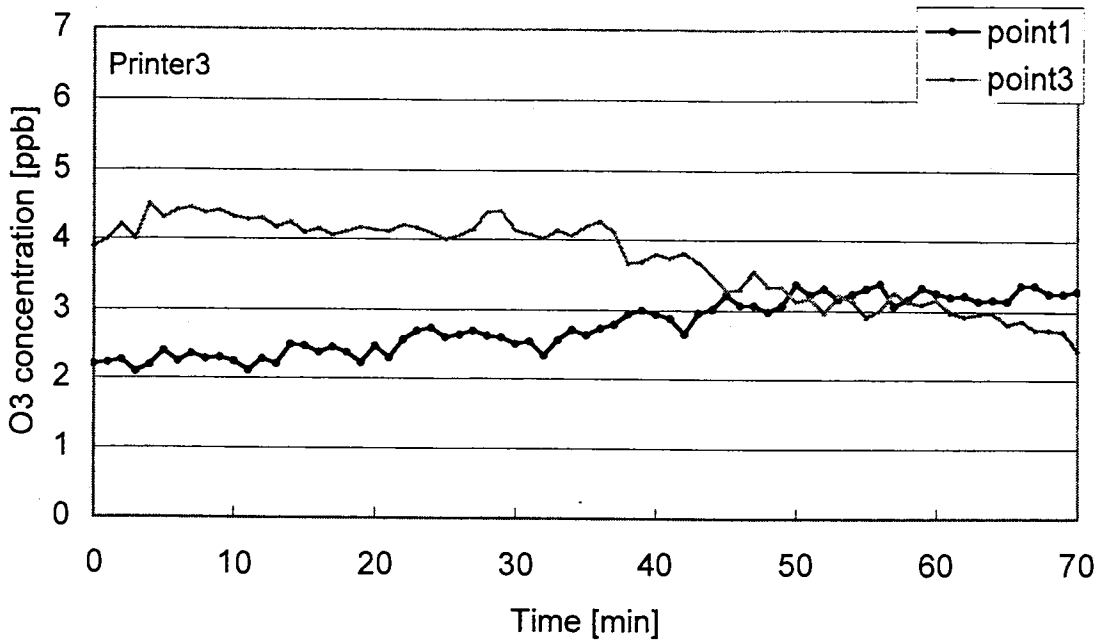
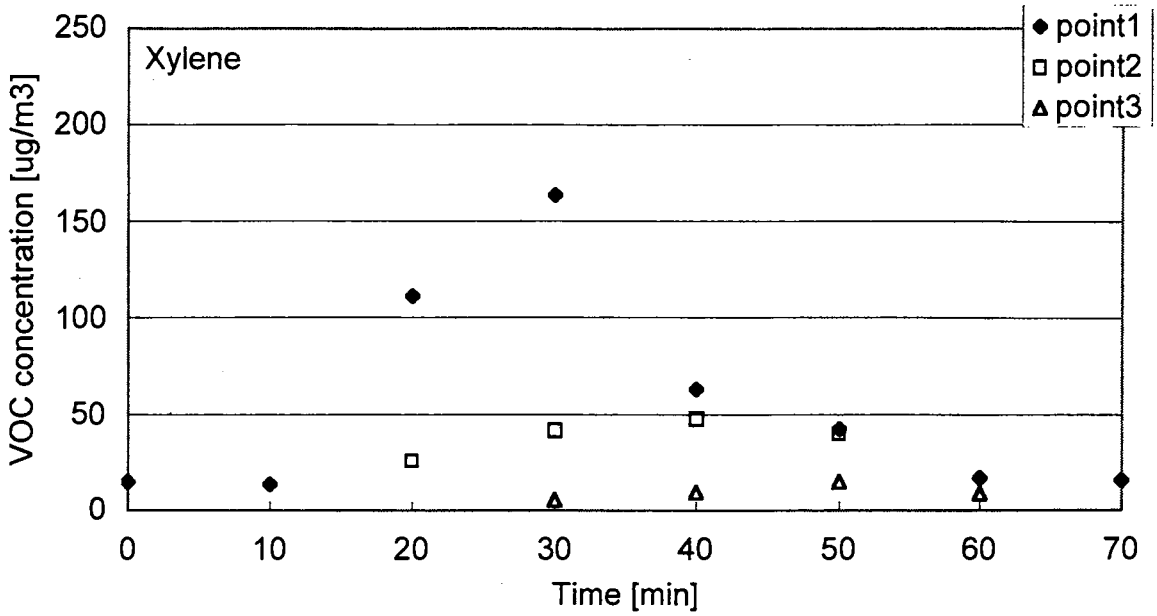


図 2-2-7　オゾン濃度の経時変化（つづき）



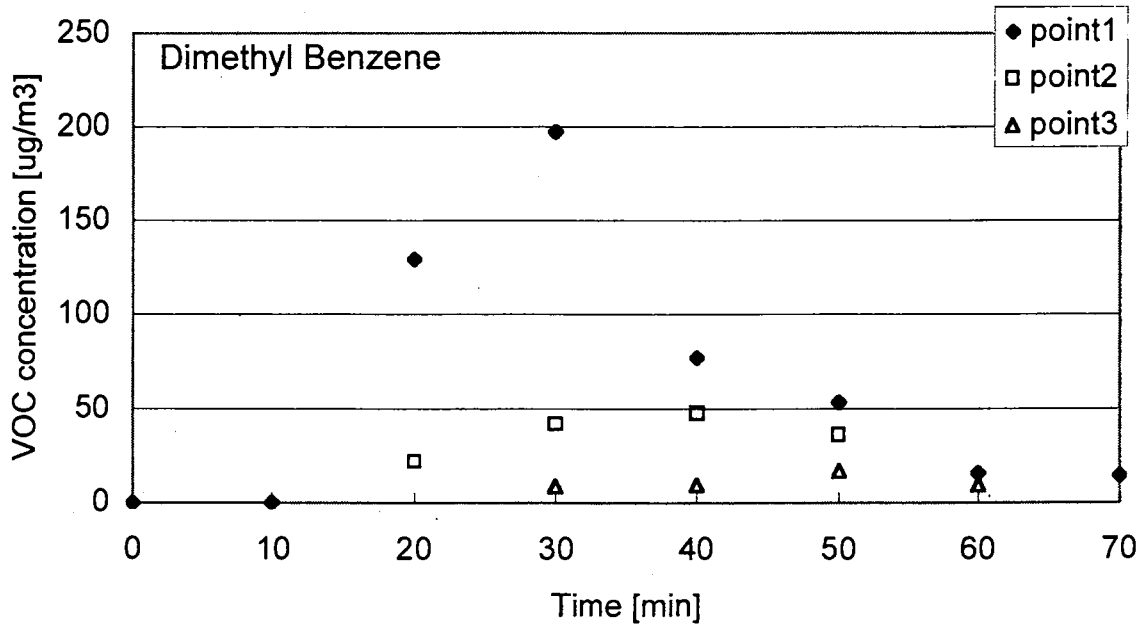
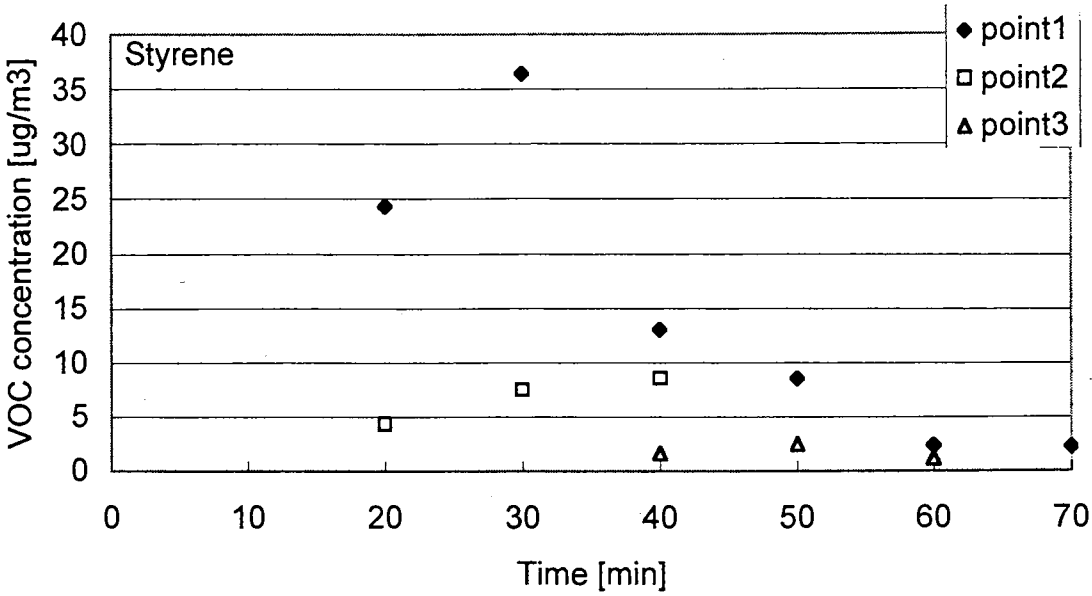


図 2-2-8　Printer1 の各 VOC 濃度の経時変化



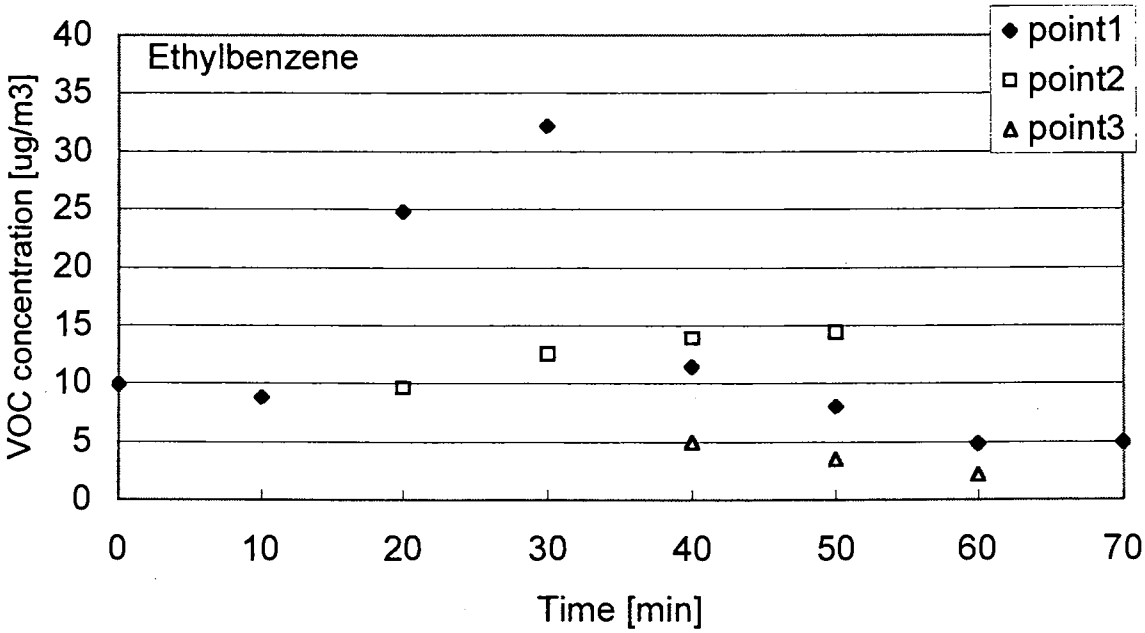


図 2-2-8　Printer1 の各 VOC 濃度の経時変化（つづき）

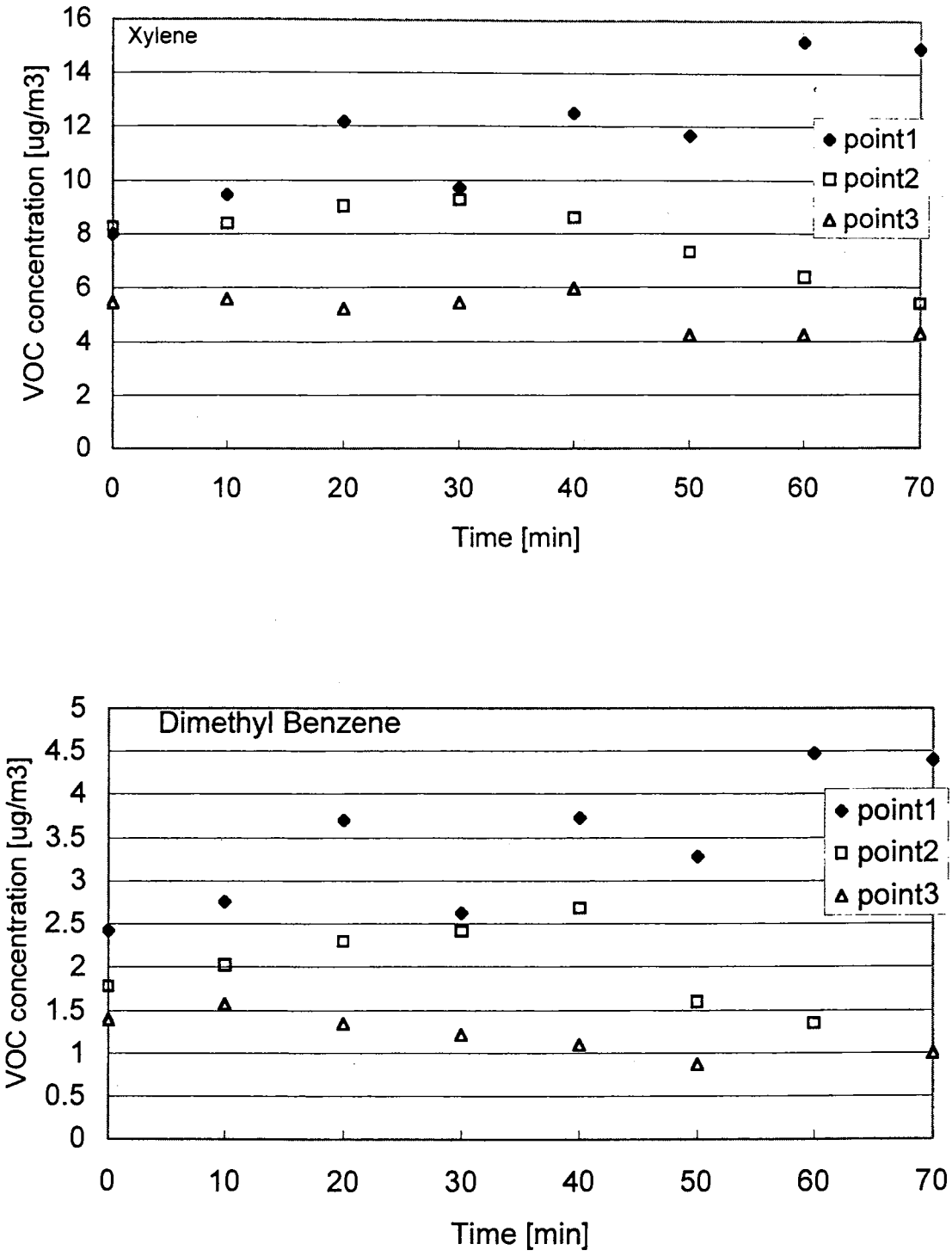
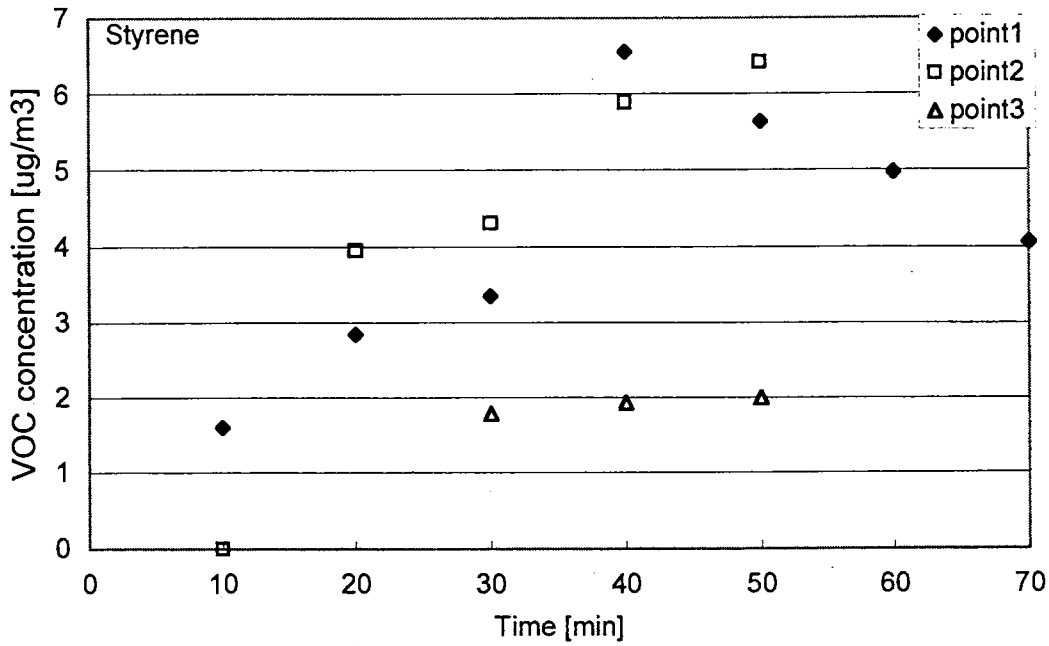


図 2-2-9　Printer2 の各 VOC 濃度経時変化



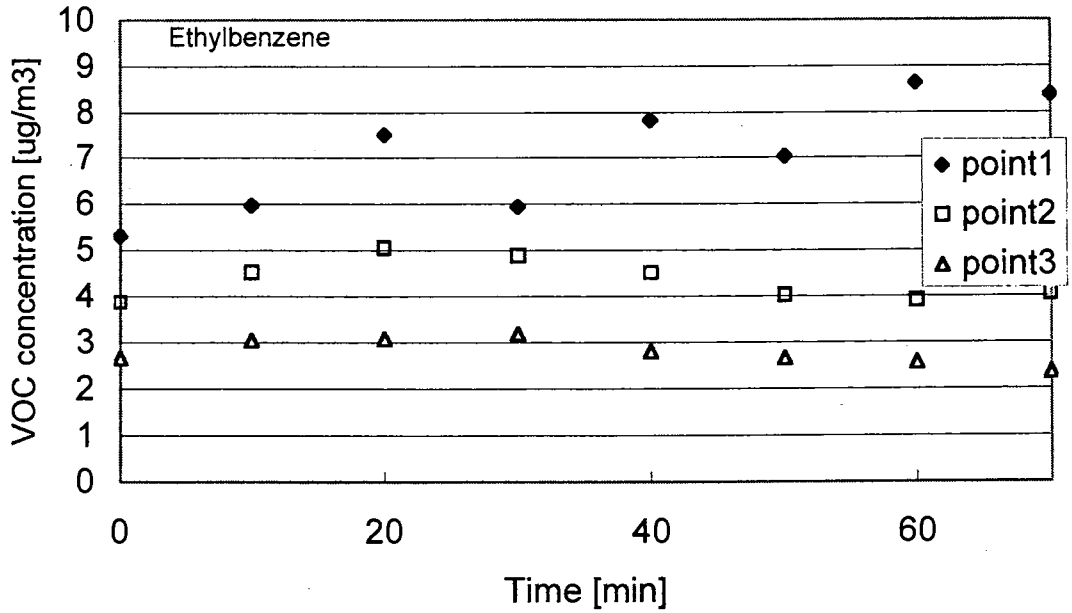


図 2-2-9　Printer2 の各 VOC 濃度の経時変化（つづき）

2-3 考察

2-3-1 微粒子

プリンタ別では，Printer1 が最も粒子発生量が多く，次いで Printer2, Printer3 という結果になった。Point 別では，Point1 が最も粒子発生が多く，次いで Point2, Point3 となった。図 2-3-1 に Point1 における粒径 50nm の粒子個数濃度の経時変化を，図 2-3-2 に Point1 におけるプリント時（35 分後）の粒径分布を示す。

プリンタの排気口近傍である Point2 で粒子濃度が低いのは，フィルターによって粒子が除去されたためと考えられる。Point1 は排紙口の真上なので，プリンタから発生する熱対流によって粒子が舞い上げられ，粒子濃度の最も高い場所になっている。Point3 では，Printer1 と Printer3 はプリント時に粒子濃度が増加しておらず，粒径分布にもプリンタの運転の影響が見られない。しかし，Printer2 では 50nm 付近の粒子の増加がみられる（図 2-2-3, 4)。これは，Printer2 から発生する粒子が Printer1, 3 よりも小さく，そのためにプリンタから遠い Point3 まで運ばれたと考えられる。

粒径については，どのプリンタも 100nm 以下の粒子が発生している。これは呼吸器官に取り込まれやすいと言われる 0.1μm 前後の粒子を含んでいる。

2-3-2 オゾン

プリンタの運転によってオゾン濃度に変化が見られたのは Printer1 のみだった。図 2-2-7 に示したように，Printer1 の Point1 と Point2 ではプリント時に明確なオゾン濃度の上昇が見られる。Point2 での濃度上昇が Point1 より小さいのは，排気口のフィルターによってオゾンが吸収されたためと考えられる。Point1 ではオゾン濃度が最大 4.5ppb 上昇したが，プリント中は増減を繰り返し，安定しなかった。これは，

オゾンが反応性に富むために空気中で消失するためと考えられる。Point3 でオゾン濃度に変化がなかったのも，空気中で消失したためと予想される。結果として，プリントによるオゾンの室内濃度の増加には至らなかった。

2-3-3 VOC

プリンタからの発生と評価できた物質は，レーザープリンタからは Xyrene，Dimethylbenzene，Styrene，Ethylbenzene で，インクジェットプリンタからは目立った VOC の発生はなかった。定性できた物質は 1 回の捕集で約 20 種類にも及ぶが，一貫して高濃度で検出されたのはこれらの 4 物質だけだった。

Printer1 では，Xyrene，Dimethylbenzene，Ethylbenzene ともアイドリング時は Point1 では低濃度だったが，プリント開始によって急激に上昇した。最も高濃度だったのは Dimethylbenzene で，200 μg/m^3 に達した。次いで Xyrene が高濃度で，Ethylbenzene は比較的低く，40 μg/m^3 未満だった。Styrene だけは他の物質と違い，アイドリング時には全く存在しなかったが，プリントによって濃度が上昇した。これは Styrene がトナーに含まれていることからも，妥当な結果と言える。他の物質は，プリンタのケーシング，またはトナーなどが熱せられて発生したと考えられる。したがって，プリンタの温度が上がるプリント時に，これらの物質の濃度も上昇する。

Printer1 では，各 VOC がプリント中は増加し続けた。グラフでは 40 分の時点では濃度が減少しているが，これは 30 ～50 分の間で捕集された VOC の値なので，プリント中は増加し，プリントが終わると減少したためと考えられる。Printer2 では値が変動しているが，Styrene は明らかな上昇が見られる。しかし，Printer1 に比べるとその濃度は 5 分の

1 程度である。Xyrene, Dimethylbenzene, Ethylbenzene の濃度も，Printer1 の 10 分の 1 程度となっている。これは，Printer2 のアイドリング時およびプリント時の発熱の少なさに関係していると考えられる。

Point ごとの評価では，やはり Point1 が最も顕著に発生しており，Point2 でも濃度上昇がはっきりと出ている。また，Point3 でも微量ながら VOC が測定されたことから，長時間のプリントでは，広範囲で室内濃度の増加が予想される。

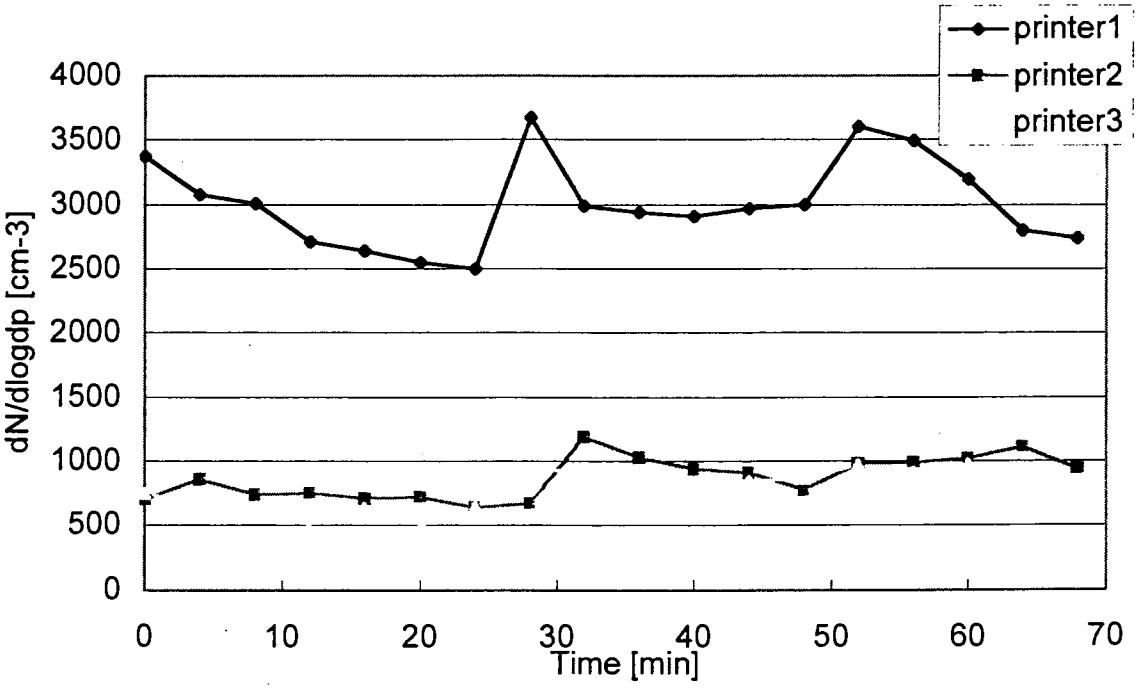


図 2-3-1 Point1 における粒径 50nm の粒子個数濃度の経時変化

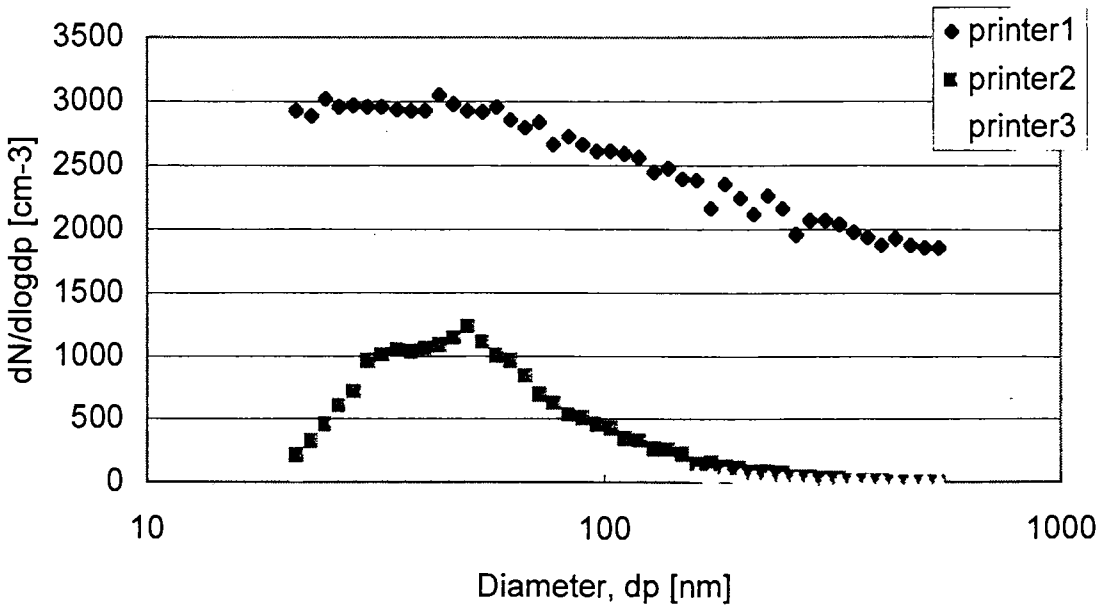


図 2-3-2 Point1 におけるプリント時（35 分後）の粒径分布

第３章プリンタから発生する汚染物質のチャンバーを用いた測定

3-1　チャンバー実験

第３章では，チャンバーを使った実験を行い，プリンタから発生するオゾンとVOCの発生特性を明らかにした。

3-1-1　チャンバーの概要[17)18)19)20)]

プリンタから発生する汚染物質を厳密に評価するためには，外気の影響をなくすために，密閉し制御された空間でプリンタを運転させる必要がある。そのためにチャンバーを作製した。製作にあたっては，欧州コンピュータメーカー協会（ECMA）が2001年8月に発表した協会規格「電化製品からの化学物質放散測定法」に従った。

チャンバーは，吸収・吸着の少ない内面アルミニウム仕上げで，気積は562 L（W×L×H=91cm×65cm×95cm）で，内部の天板がパンチングメタルの台にプリンタを設置できるようになっている。プリンタの操作はチャンバー外部のコンピュータで行う。図3-1-1にチャンバー実験の装置の概要を示す。

発生したガスを効率よく捕集するために，チャンバー内に給気して換気を行った。ポンプによって清浄空気を，10.0 L/minでチャンバー内のプリンタの下部へ送り込んだ。発生ガスの捕集は，チャンバー上部のサンプリングポイントから行った。リークのため，回収できた流量は3.0 L/minだったが，測定に必要な2.33 L/minを満たし，リークによってチャンバー内は正圧になっているので外気の侵入はないものと考える。

予備実験として，チャンバーにプリンタを入れない状態でバックグラウンドを測定した。図3-1-2にバックグラウンドのVOCのクロマトグラフを，表3-1-1に各VOCの濃度を示す。オゾン濃度に関しては，実験日によって変動が

あったが，内部からの発生はなかった。

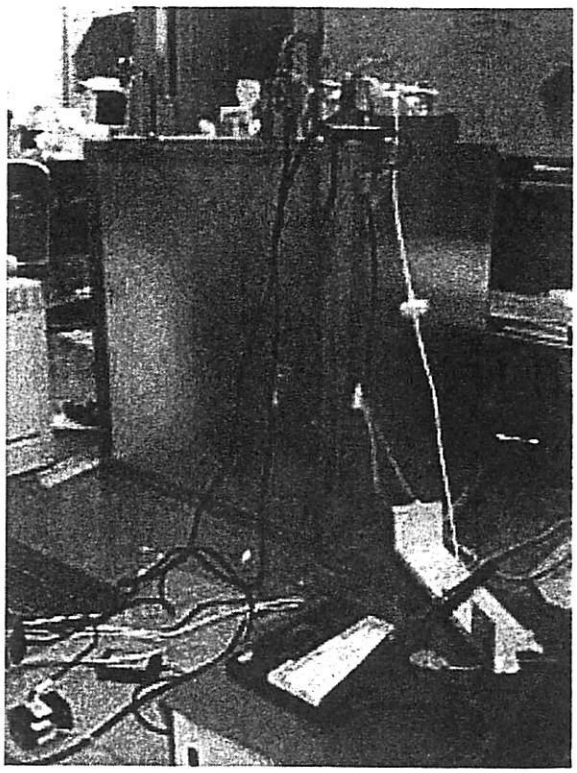


写真 3-1　チャンバー実験の様子

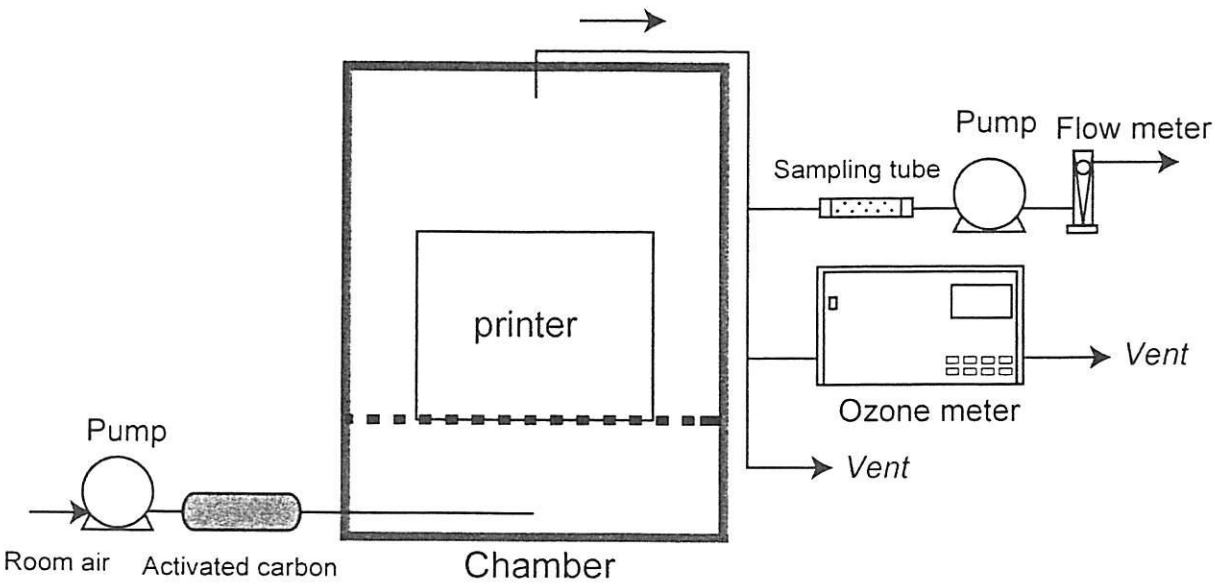


図 3-1-1　チャンバー実験の装置の概要

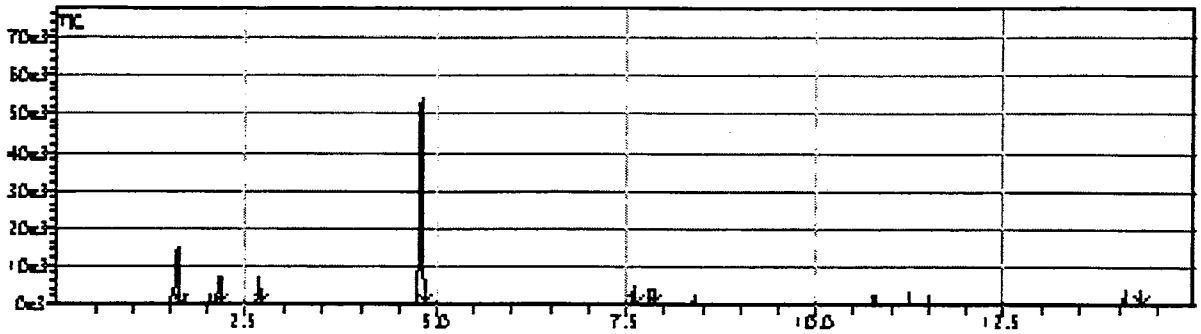


図 3-1-2　バックグラウンド VOC のクロマトグラフ

表 3-1-1　各 VOC の濃度

化合物名	濃度(ug/m^3)
1,1-Dichloro-1-fluoroethane	2.4329326
1,3-Propanediamine	0.8608735
Oxetane, 3,3-dimethyl-	0.8936844
Toluene	11.070644
(-)-(5s)-Benzyloxymethyl-4-methyl-2(5H)-furanone	0.6603561
N-Ethylformamide	0.3079592

3-1-2　チャンバー実験の方法

チャンバー実験の対象とするプリンタは，実測と同様だが，改めて表 3-1-2 にその概要を示す。試験体をチャンバー内に設置して密閉してから，図 3-1-3 に示すような手順で実験を行う。本実験は，10 分間の印刷の前後に 10 分間のアイドリングを行う。印刷は標準テキスト（黒字原稿，10.5 ポイント 1080 字，文字種「あ」）で行った。計測はオゾンと VOC のみとした。

VOC は 0.5 L/min で 5.0 L 捕集し，測定値は捕集した 10 分間の平均値と見なした。

また，VOC の発生する原因を特定するためにアイドリングのみを 30 分間行う実験，電源 OFF の状態で 30 分間放置する実験も行った。また，Printer1 ではプリンタを動かして白紙を排紙させる実験も行った。

測定機器は，実測の場合と同様である。温度・湿度の測定には温湿度記録計（SATO: SK-L200TH）を用いた。

表 3-1-2　試験体の概要

試験体	機種	印字方式	製造年
Printer1	hp LaserJet 4100	乾式電子写真方式	2001
Printer2	Cannon LBP-2510	半導体レーザ＋乾式電子写真方式	2002
Printer3	Cannon BJ F9000	シリアルバブルジェット方式	2001

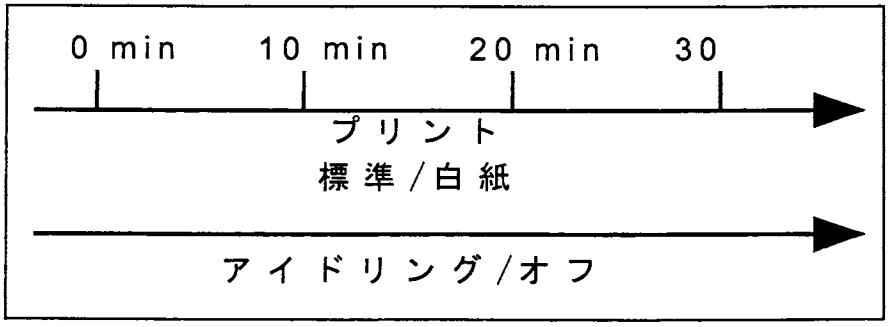


図 3-1-3　チャンバー実験タイムスケジュール

3-2　実験結果

3-2-1　温度・湿度

本実験を行った時のチャンバー内の温度と湿度の経時変化を，図 3-2-1～3 に示す。

3-2-2　オゾン

図 3-2-4 に，Printer1，2 のチャンバー実験によるオゾン濃度の経時変化を示す。Printer3 については，オゾンの測定は行わなかった。

3-2-3　VOC

図 3-2-5～7 に Printer1，2，3 の各 VOC 濃度の経時変化を示す。また，図 3-2-8 にプリンタを ON/OFF にして VOC を測定した結果を示す。図 3-2-9～11 は，標準印刷と白紙印刷による各 VOC 濃度の比較を示したものである。この実験は印刷のみ行い，0.5 L/min で 2.5 L 捕集した。

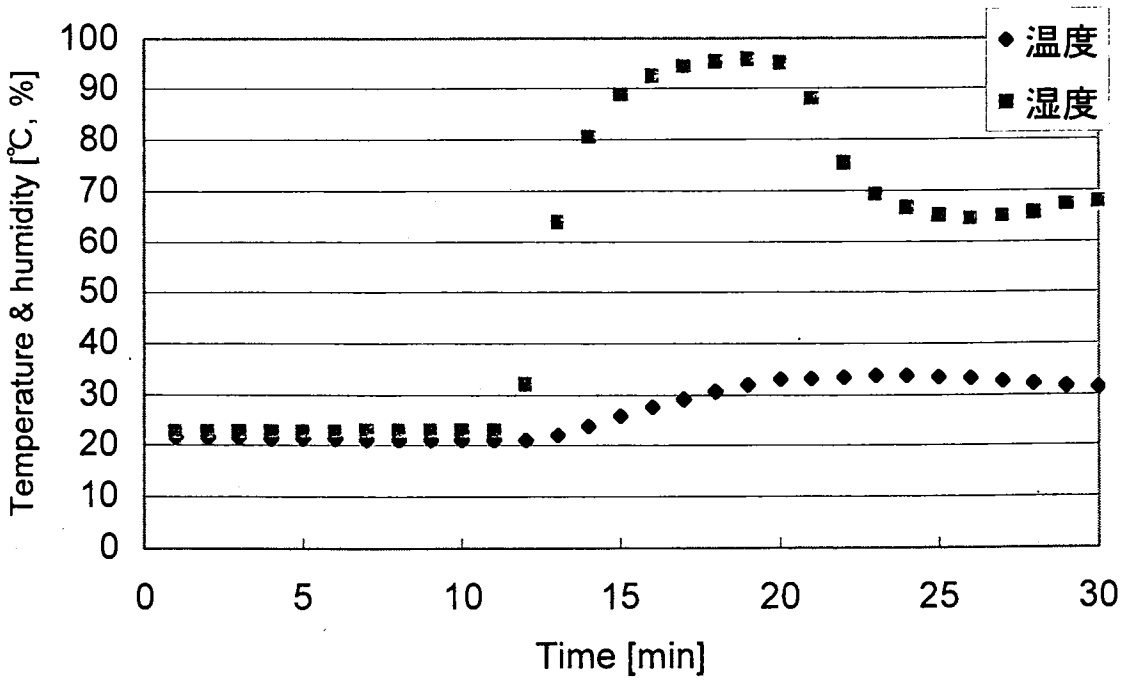


図 3-2-1　Printer1 のチャンバー内の温湿度の経時変化

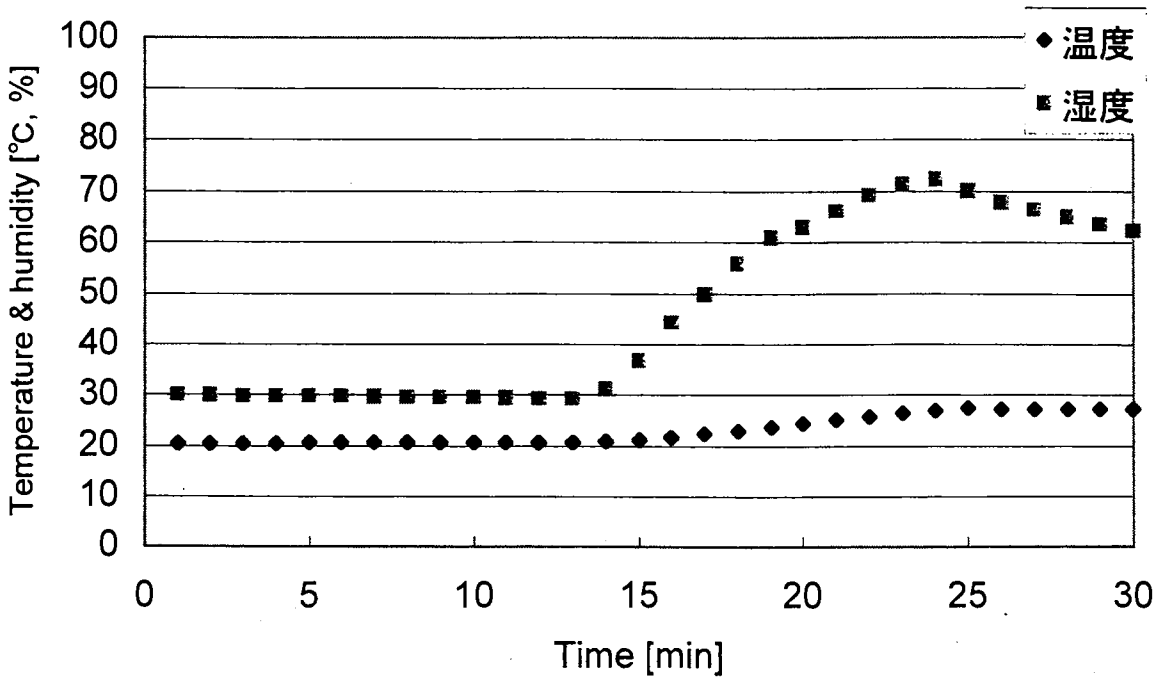


図 3-2-2　Printer2 のチャンバー内の温湿度の経時変化

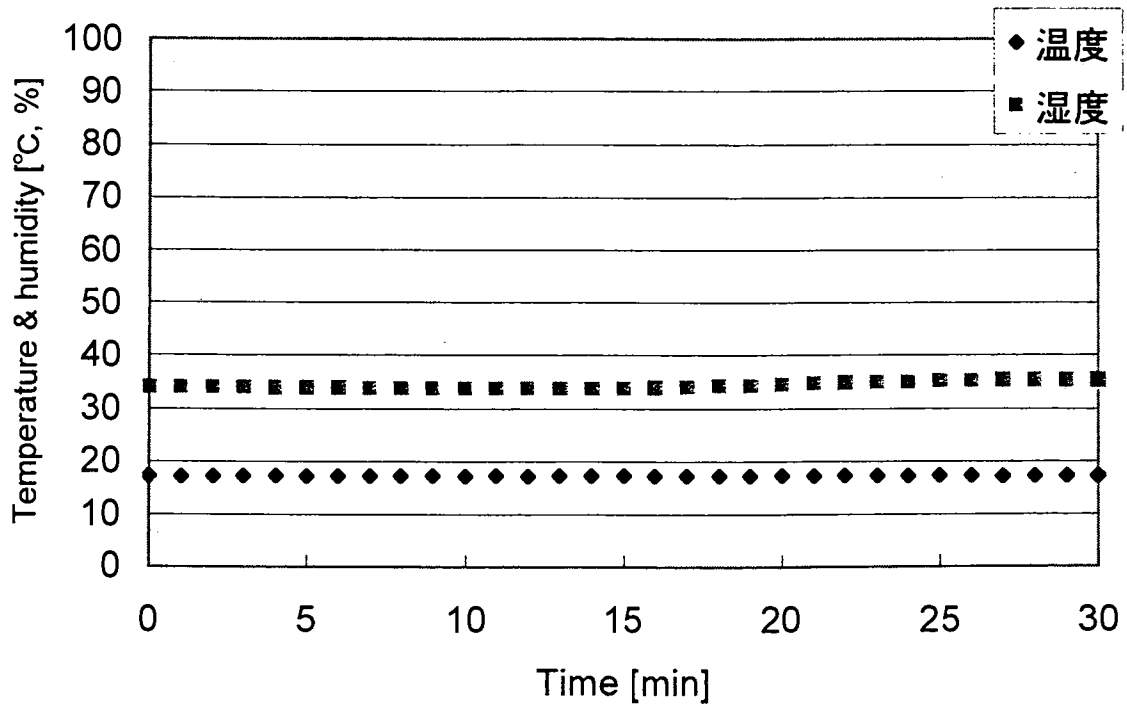


図 3-2-3　Printer3 のチャンバー内環境の経時変化

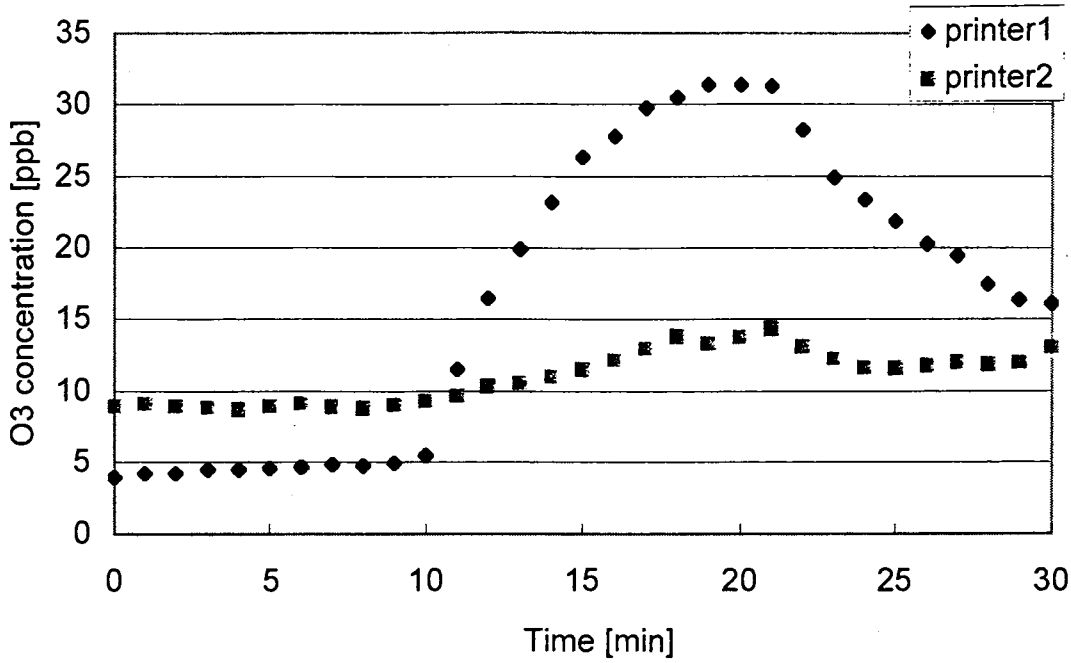
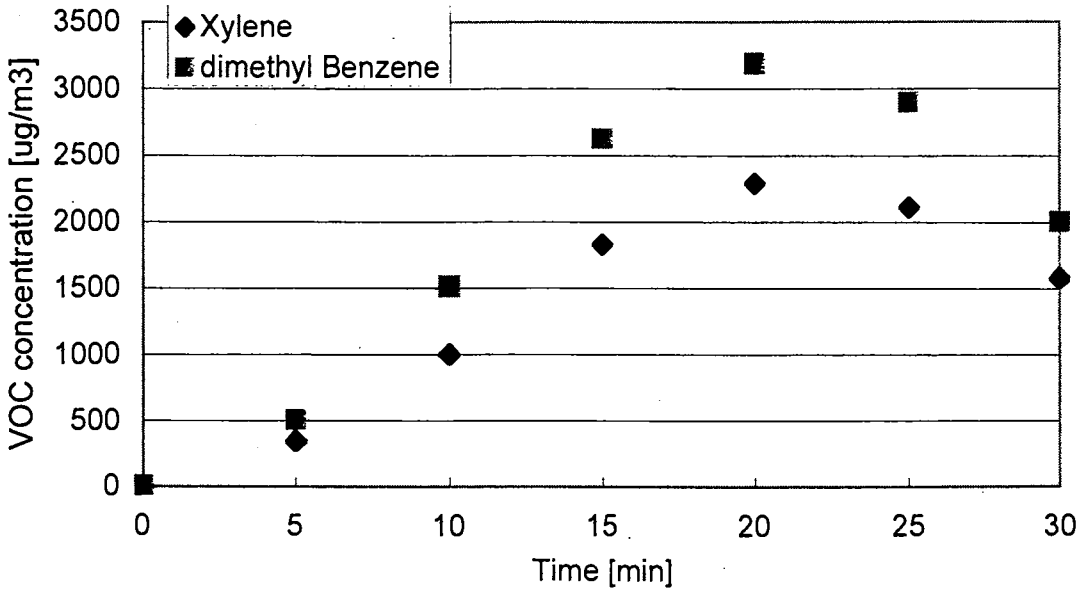


図 3-2-4　Printer1，2 のオゾン濃度の経時変化



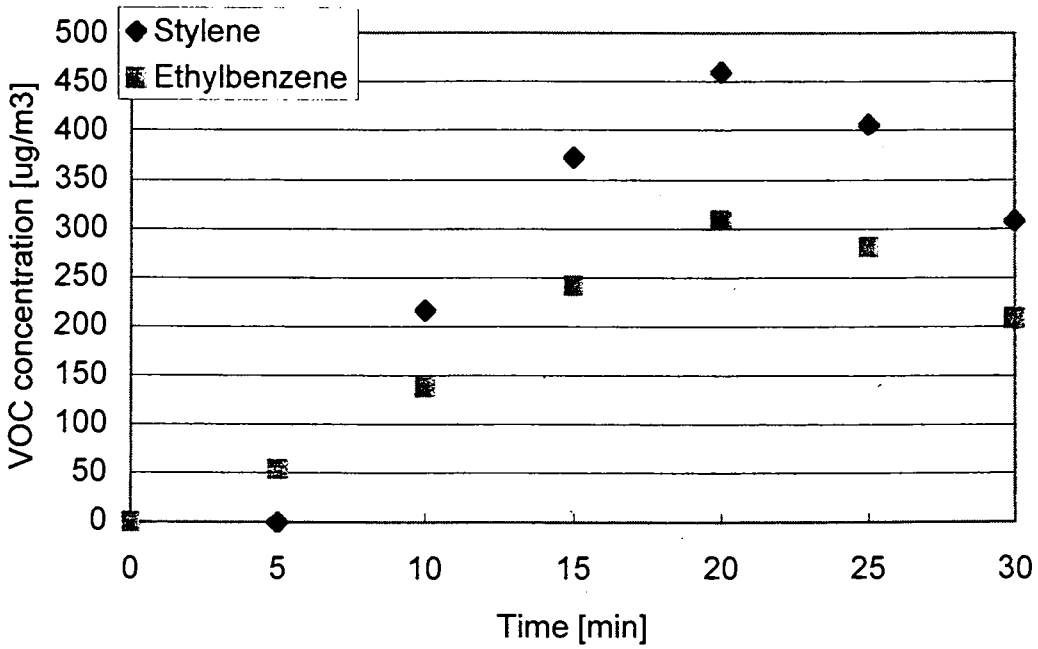
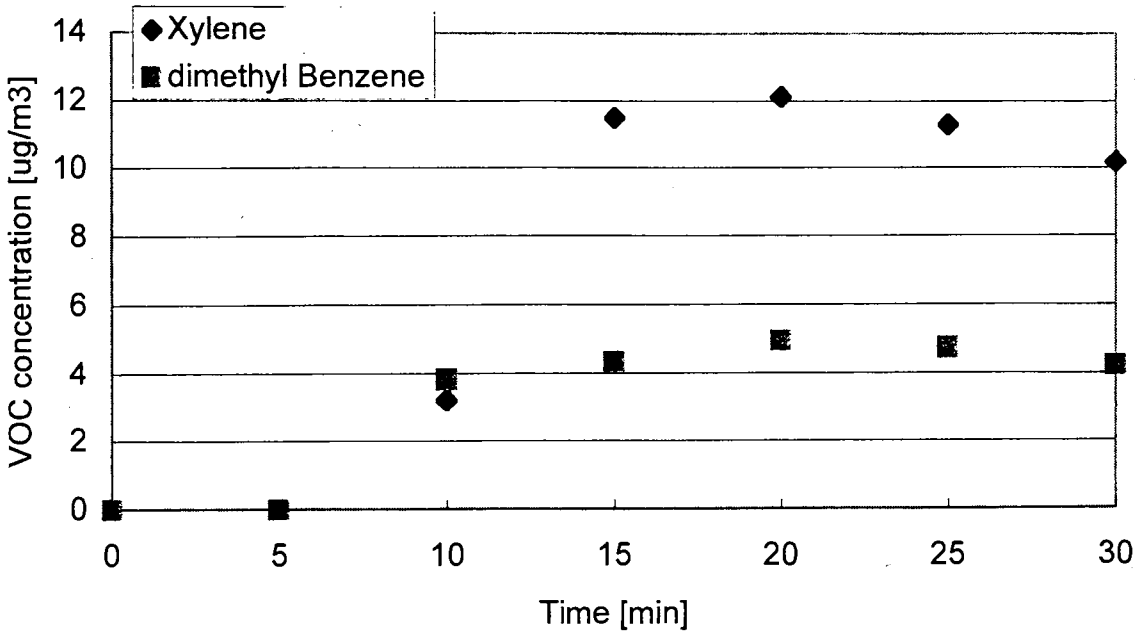


図 3-2-5 Printer1 の各 VOC 濃度の経時変化



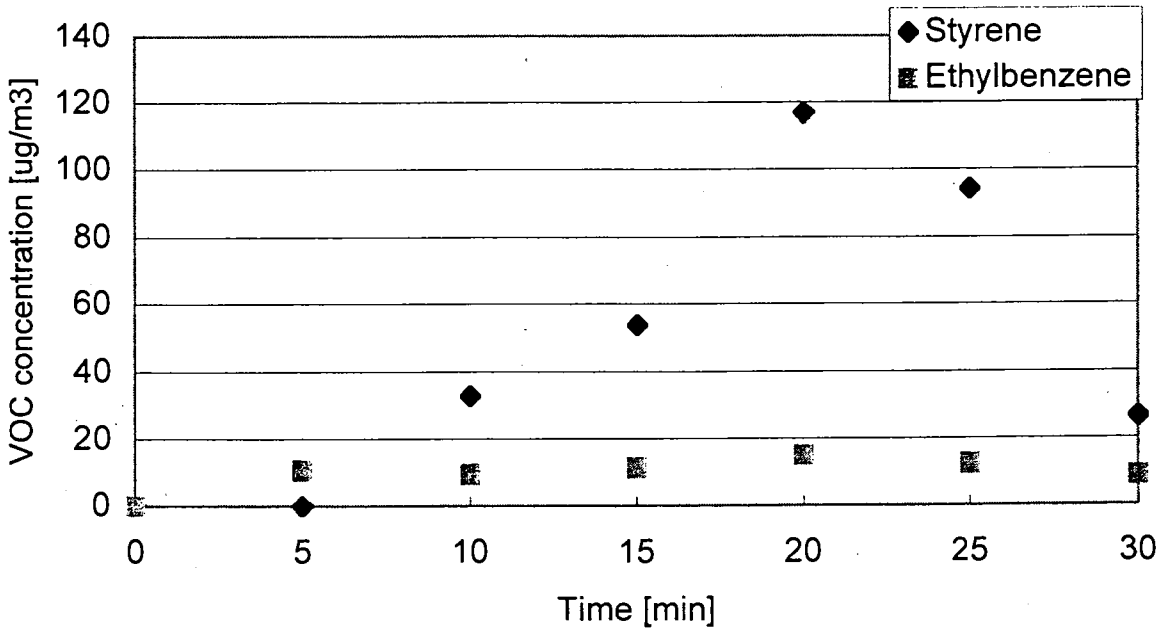


図 3-2-6　Printer2 の各 VOC 濃度の経時変化

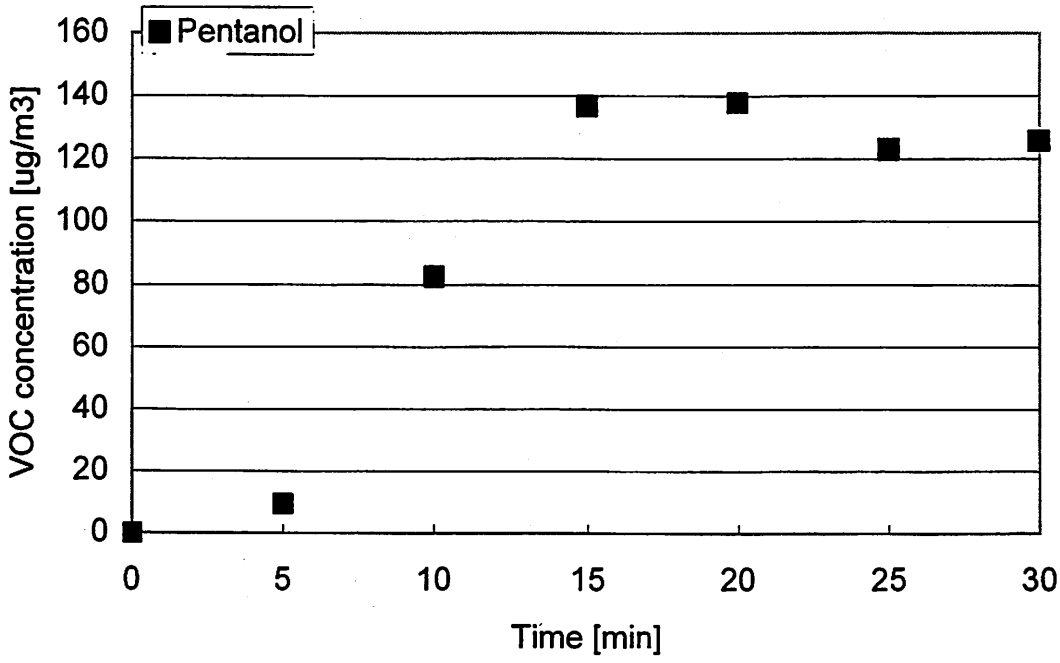


図 3-2-7　Printer3 の各 VOC 濃度の経時変化

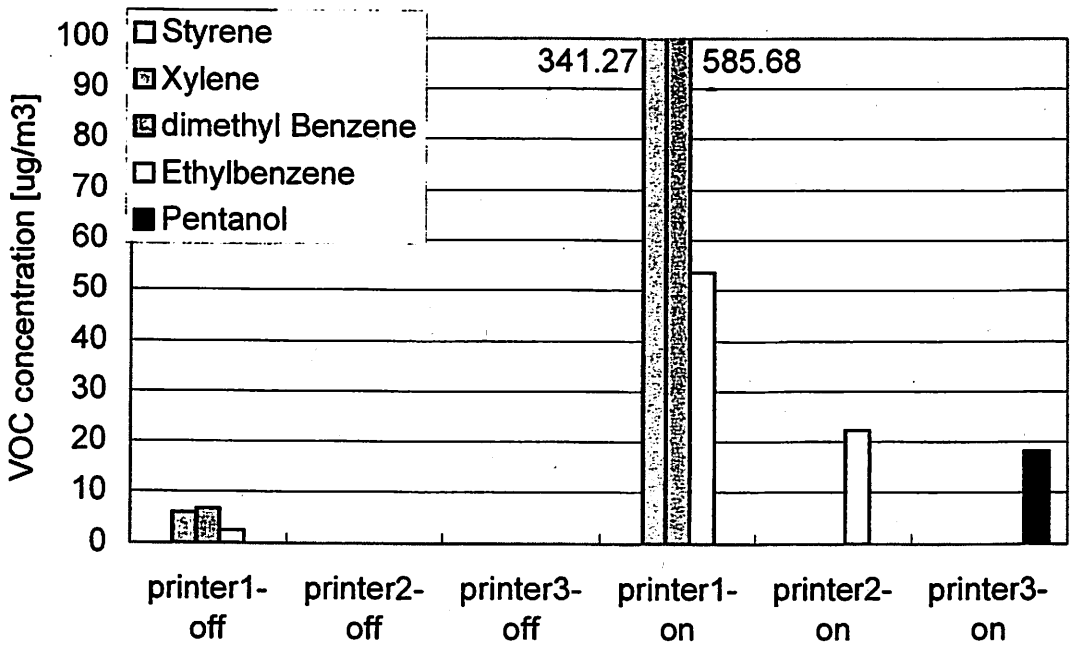


図 3-2-8　Printer3 の各 VOC 濃度の経時変化

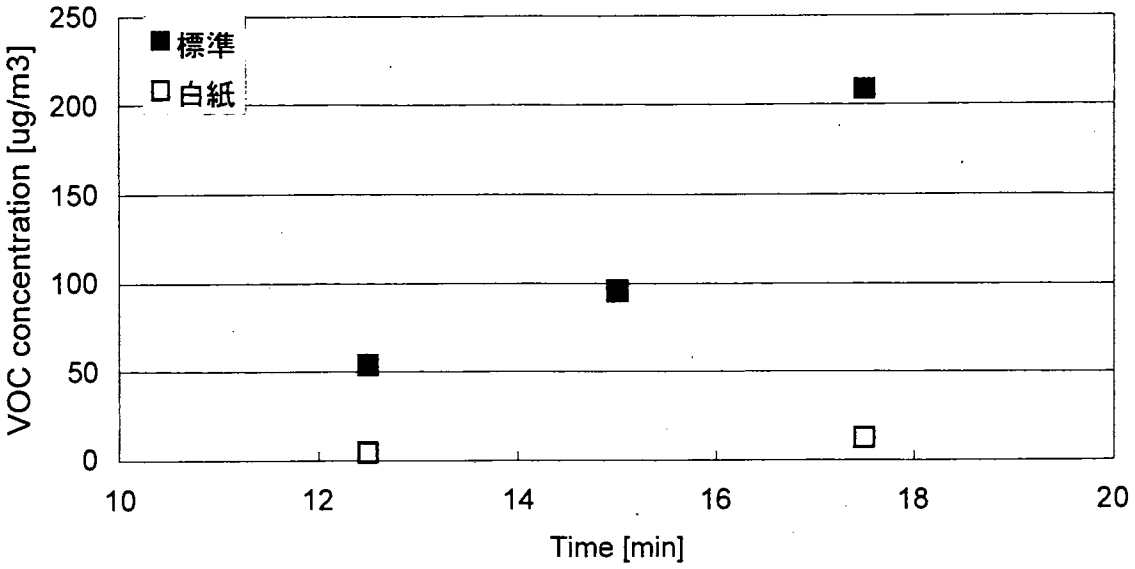


図 3-2-9　標準/白紙印刷における Styrene 濃度の比較

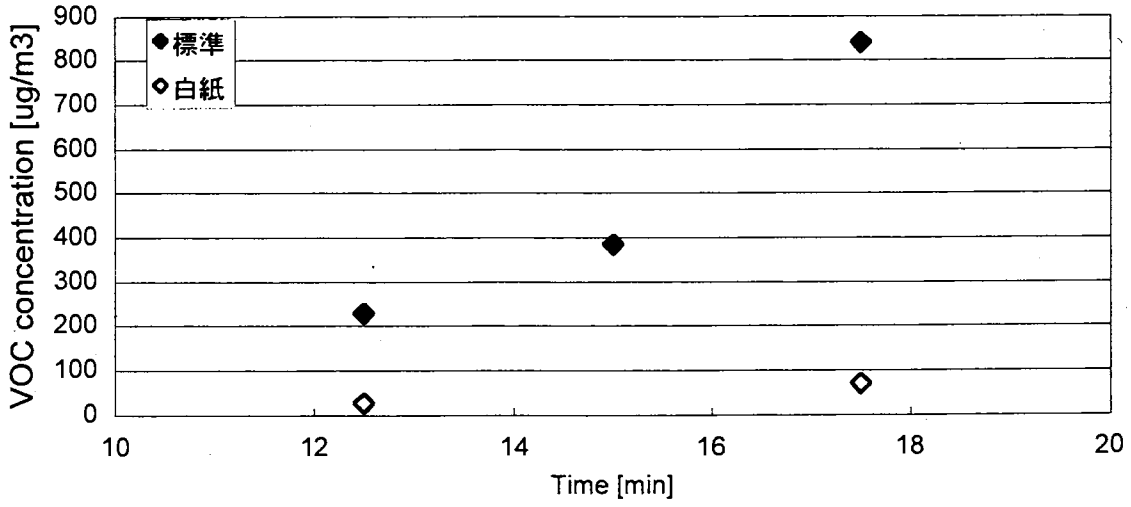


図 3-2-10　標準/白紙印刷における Xylene 濃度の比較

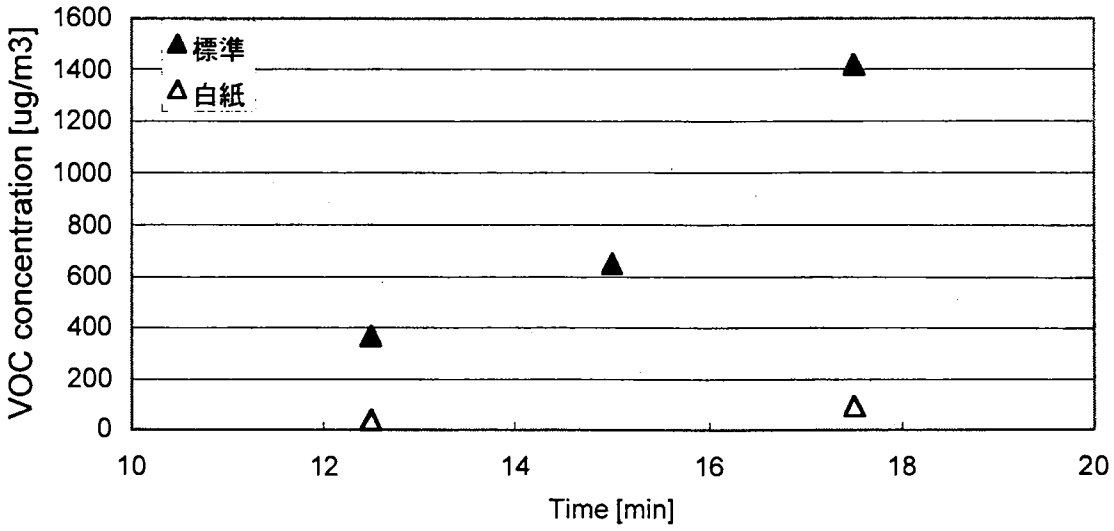


図 3-2-11　標準/白紙印刷における Dimethylbenzene 濃度の比較

3-3　考察

3-3-1　温度・湿度

チャンバーは，換気量が少なく機密性が高いため，温度・湿度を実空間と比べることは無意味だが，プリンタの運転に適切な環境は最低限維持する必要がある。チャンバー内温度は，Printer1 が 15℃上昇し，Printer2 は 10℃上昇した。Printer3 はほとんど温度は上がらなかった。温度の面では，10～35℃という環境条件をクリアすることができた。また，Printer1 が Printer2 よりも発熱することも確認した。

湿度に関しては，Printer1 が相対湿度が 98%にまで達し，環境条件の 0～95%をクリアできなかった。Printer2 は，Printer1 ほどではなかったものの，30%から 70%に上昇した。なお，Printer3 はほとんど変化しなかった。

温度・湿度の上昇が測定に与える影響は定かではないが，今後これらを制御できるチャンバーで実験をする必要がある。また，レーザープリンタは環境に対する負荷がインクジェットに比べて大きいことを確認した。

3-3-2　オゾン

図 3-2-4 に示したように，チャンバー実験ではオゾン濃度は安定して測定された。Printer1 は約 25ppb，Printer2 は約 5ppb 上昇し，Printer1 の方が Printer2 よりもオゾン発生量が多いという実測の結果に沿う形になった。

どちらのプリンタも印刷開始から増加し始め，やがて定常に達した。印刷をやめるとオゾン濃度はただちに減少し始めるが，すぐに初期濃度には戻らずにゆっくりと減少した。

3-3-3 VOC

レーザープリンタからは，実測と同様に Styrene，Xylene，Dimethylbenzene，Ethylbenzene が同定できた。また，インクジェットプリンタからは Pentanol の発生を確認することができた。

レーザープリンタから発生する VOC は，実測よりも著しく高い濃度で測定された。Printer1 では，Xylene は約 2000 $\mu g/m^3$，Xylene は約 3000 $\mu g/m^3$，Styrene は約 500 $\mu g/m^3$，Ethylbenzene は約 300 $\mu g/m^3$ と，実測における Point1 での濃度の約 10 倍の値を示した。一方，Printer2 では Styrene 以外はほぼ実測の Point1 と同様の濃度を示した。Styrene は 100 $\mu g/m^3$ に達し，実測の値を大きく上回った。発生特性は実測と同様で Xylene, Dimethylbenzene, Ethylbenzene はアイドリング時から存在し，印刷と同時に上昇するが，Styrene は印刷時にのみ測定され，上昇した。

Printer3 からは，100 $\mu g/m^3$ をこえる Pentanol が測定され，印刷開始と同時に上昇する挙動を示した。Pentanol は，アイドリング時には極めて微量なことと，プラスチック・ケーシングから揮発する物質ではないことから，インク由来の VOC だと考えられる。

次に，プリンタを ON/OFF の状態にして VOC の測定を行った実験では，図 3-2-9 に結果を示すように，Xylene，Dimethylbenzene，Ethylbenzene はアイドリング状態（ON）でも発生しており，揮発しやすい物質と言える。OFF の状態では，どの VOC もほとんど検出されなかった。Styrene は，アイドリング状態でも発生していな

い。また，図 3-2-10 に示した標準印刷と白紙印刷の比較では，白紙印刷の場合は極めて微量しか出ていない。以上のことから，Styrene はトナー由来であると言える。Xylene，Dimethylbenzene の白紙印刷時の発生も少ないが，Styrene に比べれば多く，これは，トナーへの加熱がないために温度が標準印刷ほど上がらなかったためと考えられる。

第４章　結論

4-1　本研究のまとめ

本研究は，プリンタから発生する汚染物質の発生特性とその室内空気質への影響を評価することを目的とした。実空間においてプリンタを運転して実測を行い，室内空気質への影響を評価した。また，汚染物質の発生特性を評価するためにチャンバーを作製して，チャンバー実験を行った。

本研究において得られた結論を以下にまとめる。

1) レーザープリンタからは，種類によって発生量に差はあるが，オゾンおよび粒子，VOC が発生する。排気口のフィルターによってこれらの汚染物質は軽減されるが，排紙口から高濃度で発生する。VOC は，プリンタのプラスチック・ケーシングから発生する Xylene, Dimethylbenzene, Ethylbenzene, トナーから発生する Styrene などが確認された。発生した粒子は，ほとんど 10μm 以下の微小なものであった。オゾンは発生しても反応により消失するが，粒子および VOC は室内に拡散して室内空気質を悪化させる懸念がある。
2) インクジェットプリンタ（バブルジェット方式）は，オゾンの発生はなく，粒子発生もレーザープリンタに比べると微量であった。しかし，VOC はインク由来の Pentanol が発生することが確認された。
3) チャンバー実験では，実測の 10 倍近い濃度でオゾンと VOC が測定された。実空間では汚染物質は環境中に拡散されるものと考えられる。

4-2 今後の課題

本研究のさらなる発展を期し，今後の課題を以下にまとめる。

- オゾンと VOC の反応によって粒子やアルデヒドが発生する二次汚染が考えられる。
- 本研究で作製したチャンバーは，温湿度環境を制御することができなかった。環境条件を実空間に近づけたチャンバーによって汚染物質の発生量を測定することが必要である。
- 本研究ではインクジェットプリンタをバブルジェット方式のもの 1 台しか試験しておらず，ピエゾ方式のものも含めて試験体の数を増やして VOC の定性・定量を行い，比較する必要がある。
- 本研究で計測した粒子は，粒径 20～500nm の範囲だけなので，20nm 以下の超微粒子は検討されていない。

参考文献

1) L.A.ワッデン, P.A.シェフ: 室内空気汚染, 日本建築学会

2) 柳　宇: オフィス内空気汚染対策技術書院 (2001)

3) 健康住宅推進協議会: わかりやすい空気環境の知識, オーム社出版局 (1998)

4) 建設省住局住宅生産課監修: 健康で快適な住宅研究会編集：健康快適住宅宣言, ケイブン出版 (1991)

5) ドイツ連邦環境省：ブルーエンジェル, http://www.blauer-engel.de/

6) 日本環境協会：エコマーク, http://www.jeas.or.jp/ecomark/index.html

7) 健康住宅研究会: 室内空気汚染低減のための設計・施工ガイドライン

8) 建築雑誌, Vol.113, No1421 (1998)

9) 野崎淳夫: オゾン発生源による室内空気質汚染に関する研究, 空気調和・衛生工学会 (2001)

10) 房家正博: 空気清浄機から発生するオゾンとその室内濃度に与える要因 (1998)

11) 並木則和: プリンタからの発塵を対象とした IAQ 評価, 日本建築学会 (2002)

12) 日本サーモエレクトロン: オゾン自動分析計 MODEL49C 取扱説明書

13) 日本カノマックス: SMPS MODEL3022 取扱説明書

14) 島津製作所: GC/MS 17A,QP5050A 取扱説明書

15) 日本事務機械工業会規格: 複写機のオゾン・粉塵・スチレン測定方法 (1999)

16) 山口紀宏: 家具から発生するアルデヒド類, VOCs の測定, 空気調和・衛生工学会 (2001)

17) 舟木理香: 小型チャンバーADPAC を用いたアルデヒド, VOC 放散量の測定に関する研究, 日本建築学会 (2002)

18) 朱清宇: 建材, 家電製品からの SVOC 放散量の測定, 日本建築学会 (2002)

19) ECMA(European Computer Manufacturers Association) Standardizing Information and Communication Systems: Standard ECMA-328, Detection and Measurement of Chemical Emissions from Electronic Equipment

20) 金森基: 吸着特性を考慮したVOC室内濃度予測に関する研究, 空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会 (2000)