

# 荷電および中性ナノ粒子による N95マスクの透過

アプリケーションノート RFT-007 (A4)

Hee-Siew (Ryan) HanとMark Prell  
2010年3月4日

## はじめに

エアロゾルベースの定量的フィットテストは、マスク内で検出されるパーティクルが全て面体と顔面の隙間からの漏れであるという前提の上で実施されています。N100やN99のような高捕集効率のフィルタを装着したマスクにおいてこの前提は有効で、(面体の破損等による)他の漏れはないものとされています。しかし、N95のような捕集効率の劣るフィルタを装着したマスクの場合、かなりの数のパーティクルがフィルタを透過する可能性があるため、この前提はもはや有効ではないかも知れません。フィットテスト中のフィルタを透過したパーティクルは漏れと見なされ、その結果見かけ上フィット係数は低くなり、面体と顔面の密着が充分であったとしてもフィットテストは不合格となることもあるかも知れません。

メカニカルフィルタにおける拡散効果、さえぎり効果、慣性衝突捕集による最も透過率の高い粒径(MPPS: Most Penetrating Particle Size)は、おおよそ300nm程です。しかし、最近のUSマスクメーカーから提供されるマスクの殆どが、メカニカルな捕集に加えて静電吸引機能も有しています。これらの静電フィルタは、呼吸抵抗を上げずにパーティクル捕集を増やすことが出来る優位性を持っています。

TSIがPortaCount®のアクセサリ(N95-Companion™: N95コンパニオン機能)開発時には、N95マスクのフィットを測定するために、メカニカルフィルタのMPPS(300nm)より大きく外れていることから、55nmの粒径が選択されました。この粒径がN95フィルタに於いて高効率で捕集されると仮定すれば、面体内で測定される粒子全てが面体周辺からの漏れを確実に反映していることとなります。

しかしながら、最近の研究で、市販されているN95マスクのMPPSは、40-60nmの範囲に存在するとされました。(Balazy et al., 2006; Rengasamy et al., 2007) これは、N95-Companion™機能で使用される粒径域と同じで、静電フィルタ機構のあるN95マスクにおいて、N95-Companion™機能は有効ではないという懸念が引き起こされました。

BalazyらおよびRengasamyらの研究からの透過結果は、N95-Companion™機能には当てはまらない可能性が有る点に留意する必要があります。というのは、この研究で使用されたエアロゾルは電気的に中性なもので、N95コンパニオン機能は負に帯電したエアロゾルのみを測定しているからです。荷電エアロゾルの透過特性は、中性エアロゾルとは全く異なる可能性があります。Leeら(2005)は、粒子が1価にイオン化された環境下でN95およびR95マスクを使用した際の捕集効率を研究しました。彼らは、エアロゾルが帯電した場合、N95およびR95マスクを通るエアロゾル透過が有意に低いことを確認しました。

\* PortaCount® Plus Model 8020およびN95-Companion™ Model 8095は、2008年に廃止され、PortaCount®Pro Model 8030およびPortaCount®Pro+ Model 8038に置き換えられました。モデル8038は、N95モードで操作される場合、N95-Companion™技術を使用します。TSI、TSIロゴ、PortaCount®、およびN95-Companionは、TSI Incorporatedの商標です。



TSIで行われた以前の研究では、現在のN95フィルタろ過材のMPPSが実際に40~100nmの範囲にあることを示しました。しかしながら、TSIはまた、静電ろ過機能のあるN95ろ過剤を透過する粒子は主に静電ろ過材の影響を受けない中性粒子であり、荷電粒子は効率的に静電フィルタに捕集されることを確認しました。公称55nmの粒子は負に帯電した粒子のみ、N95コンパニオン機能使用時に装置内の通過を許され、一方正に帯電した粒子と中性粒子はマスク内外どちらの測定時にも除去されます。N95コンパニオン機能は効率的に捕集される負に帯電した粒子のみを利用するため、マスク内で検出された全ての粒子は面体と顔面の隙間からの漏れによるものであるというフィットテストの前提は有効なままです。したがって、N95-Companion™機能は有効なままです。

N95フィルタのエアロゾル透過量とフィット係数へのその影響を更に定量化するために、TSIは中性、正に帯電、負に帯電の単分散エアロゾルを用いて市販のN95マスクにおいての各エアロゾルの透過率を測定する研究を実施しました。

TSI PortaCount®フィットテストのような凝縮核計数器によるマスクフィットテストに用いられる外気エアロゾル粒子は、静電的に混成であることを理解する必要があります。ある粒子は正に帯電、ある粒子は負に帯電、またある粒子は帯電していません。正荷電粒子のみ、負荷電粒子のみ、または中性粒子のみから成るエアロゾルの生成はラボ内でのみ可能です。

## 方法

NIOSHの認証を受けた5メーカー6種のN95マスクをこの研究では使用しました。各マスクはマネキンヘッドに取り付けられ、端の部分にシリコンシールを施し漏れがないようにしました。次に、マネキンを47×24×28インチの試験チャンバーの中央に設置しました。図1に実験装置を示します。

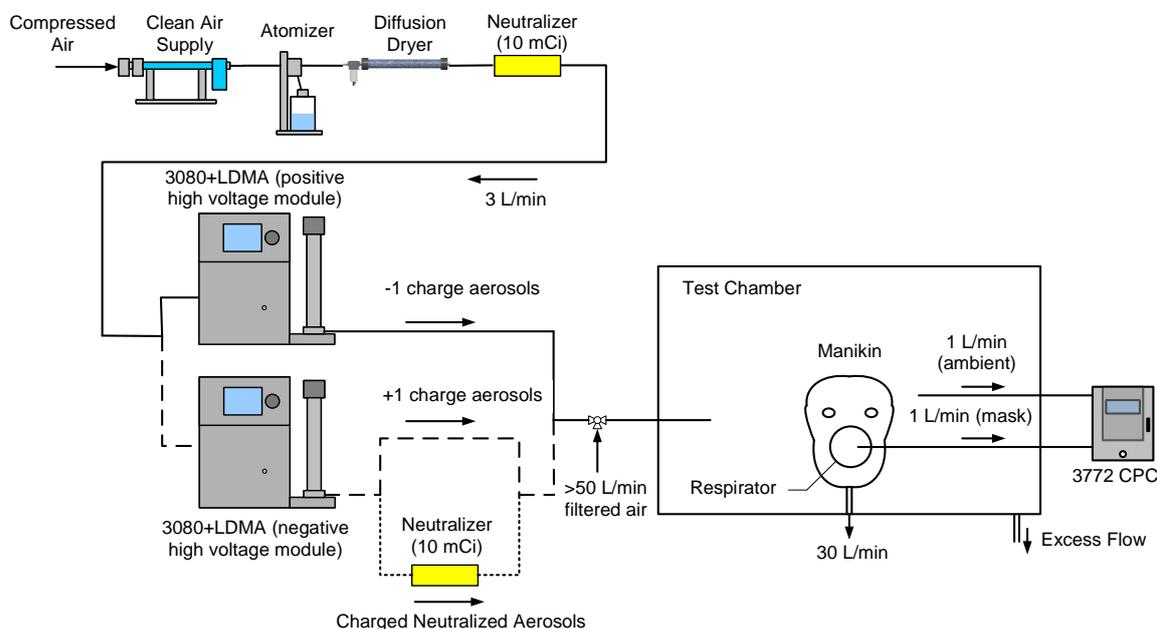


図1:実験装置

噴霧器(TSI 3076 Constant Output Atomizer)により塩化ナトリウムエアロゾルを生成しました。次いで、拡散乾燥機を使用してエアロゾルを乾燥させた後、それらを10 mCi Kr-85中和器(TSI 3012A)に導入して、噴霧プロセスによって引き起こされたエアロゾル上の高帯電を除去しました。2つの静電分級機(TSI 3080)および2つの長い微分型電気移動度分析器(LDMA)(TSI 3081)を使用して、単分散の正および負に帯電したエアロゾルを生成しました。一方の静電分級器には正に帯電したエアロゾルを生成するための負高電圧モジュール、もう一方は負に帯電したエアロゾルを生成するための正高電圧モジュールを有していました。中性エアロゾルを生成するために、10 mCi中和器(TSI 3077A)を、静電分級器の後に配置しました。中性、負に帯電、および正に帯電した単分散エアロゾルを、3つの別々の実験で一度に1つずつチャンバーに導入しました。

40、50、65、80および100nmの単分散エアロゾルをこれらの実験で使用しました。試験チャンバー導入前に、エアロゾルを少なくとも50 L/分のろ過空気と混合しました。スプレーからの流量は約3L/分であったので、試験チャンバーに入る全流量は少なくとも53 L/分でした。N95マスクを通る流量を30 L/分に制御しました。マスク内外のエアロゾル濃度は、凝縮核計数器(TSI 3772)で測定しました。マスクにはサンプリングプローブが取り付けられ、マスク内部から1 L/分のサンプルフローを吸引するようにしました。(チャンバー内の)試験剤エアロゾルは、マスクから約1.5インチ離れたところで採取しました。同時計数誤差を避けるために、ろ過された希釈空気量を調節することによって、チャンバー内のエアロゾル濃度は7000個/cm<sup>3</sup>未満に保たれました。試験チャンバーが適切にパージされ、試験チャンバー内のエアロゾル濃度が安定かつ均一であることを確実にするために、以下の試験プロトコルを使用しました:

1. 各試験の前に、試験チャンバーを少なくとも20分間パージしました。これは、試験チャンバーに設置されたブローアおよびHEPAフィルタを用いて行われました。
2. データを記録する前に、単分散エアロゾルを少なくとも30分間試験チャンバーに導入しました。
3. チャンバーエアロゾル濃度データを、3772 CPCを用いて、少なくとも1分間毎秒サンプリングしました(合計少なくとも60サンプル)。
4. 同じCPCを用いて、マスクエアロゾル濃度データを、少なくとも1分間、毎秒サンプリングしました(合計で少なくとも60サンプル)。これをマスク濃度  $C_{\text{mask}}$  とします。
5. 同じCPCを用いて、チャンバーエアロゾル濃度データを、少なくとも1分間、毎秒サンプリングしました(合計で少なくとも60サンプル)。

テストチャンバのエアロゾル濃度  $C_{\text{challenge}}$  は、マスクサンプルの前後で測定された2つのチャンバー濃度の平均値です。

マスクの透過率は、 $C_{\text{mask}}$ と $C_{\text{challenge}}$  ( $C_{\text{mask}}/C_{\text{challenge}}$ ) の比率として計算しました。

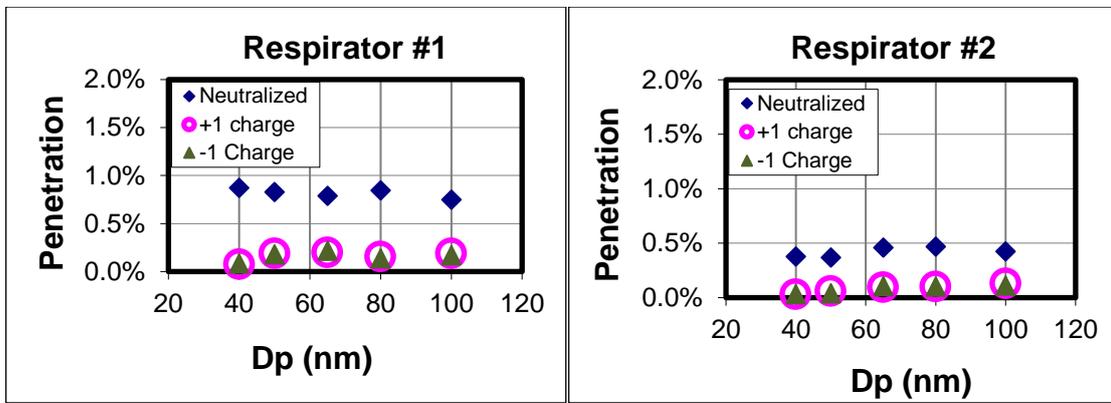
透過率(%) =  $100 * C_{\text{mask}}/C_{\text{challenge}}$

---

## 結果と考察

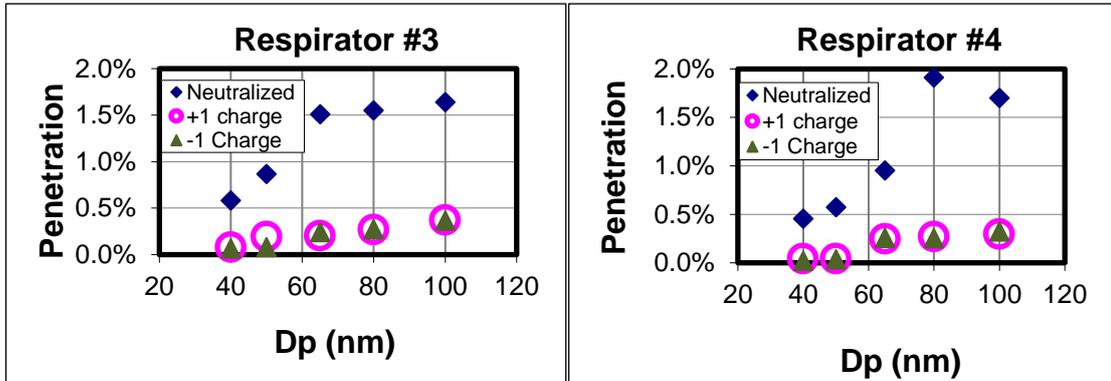
正に帯電したエアロゾルおよび負に帯電したエアロゾルの透過は、中性エアロゾルの透過よりもはるかに低いことが判りました(図2)。これらの結果は、同様のサイズの中性エアロゾルを用いたLee(等)の調査結果と同様です。Leeはまた、帯電したエアロゾルの極性はマスクフィルターのろ過効率に有意な影響を及ぼさないことも発見しました。

N95マスクをフィットテストするためのN95-Companion™機能の必要性は、マスク3および4について最も明確に示され、中性エアロゾルの透過率は、それぞれ約1.5%および2%です。中性エアロゾルを使用する粒子計数フィットテスト(すなわち、N95-Companion™テクノロジーなし)が、これらのマスクを着用する作業員に対して実施される場合、達成され得る最高フィット係数は、それぞれ67および50(フィット係数 =  $100/\text{透過}\%$ )であり、これは、半面型マスクについて、OSHAが必要とするフィット係数100未満です。フェースシールの漏れは、フィット係数をさらに低下させます。



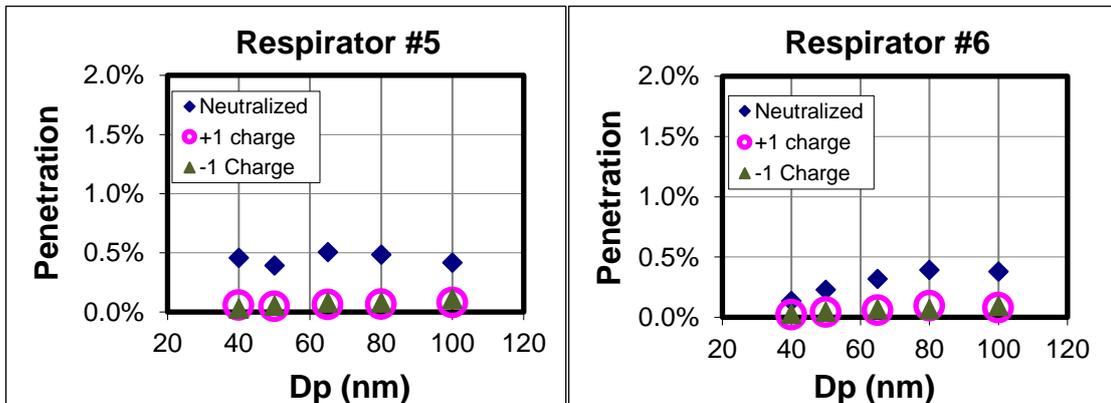
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

図2:様々なN95マスクの粒径毎の透過率%

マスク1、2、5および6はすべて、中性エアロゾル透過率が約0.5%で、(シール部からの漏れがなければ)最大フィット係数は200となることが示されました。したがって、マスクが非常によくフィットする場合、N95-Companion™機能なしでフィットテストを合格することが可能です。ただし、追加のフェースシールリークが発生すると、フィット係数が100未満に低下する可能性があります。例えば、フィルタの透過率が0.5%に固定されている場合、フェースシールの漏れは0.5%を超えることができず、超えればフィット係数が100(総漏れ量の1%)を下回るようになります。これは、最低100を要求されるフィット係数を達成するために、作業者に実質最低200のフィット係数を要求することになります。

N95-Companion™機器で利用されているように、荷電エアロゾルを使用すると、すべてのマスクは、約0.25%未満の透過を示し、(シール部からの漏れがなければ)最高フィット係数は400となることが示されました。実際のフィットテスト中に、実際のフェースシールからの漏れが0.75%、あるいは真のフィット係数133であれば、フィット係数100でテストに合格することが示されました。マスク2、5および6では荷電エアロゾルの透過率がとても低く、真のフィット係数と算出されるフィット係数の差異を大幅に減らすでしょう。例えば、フィルタ透過率が0.1%の場合、算出されるフィット係数が100を達成するために必要な真のフィット係数はわずか111(漏れ率0.9%)となります。このようにN95コンパニオン機能の利用は、フィットテストの失敗を大幅に低減します。

---

## 結論

N95-Companion™機能は、負に帯電した公称55nmのパーティクルを使ってマスクフィットを測定します。このパーティクルの透過は、メカニカル・静電フィルタにとっては僅かな物です。メカニカルフィルタの場合、その効果は慣性衝突、さえぎり効果、拡散効果に基づきます。静電フィルタの場合、前述のメカニカルフィルタの効果に静電効果が加わります。このようにN95コンパニオン機能は、NIOSHのN95シリーズまたはそれに近いろ過剤を使用したマスクのフィット測定に有効です。

---

## 参考文献

1. Balazy, A., Toivola, M., Adhikari, A., Sivasubramani, S. K., Reponen, T. and Grinshpun, S. A. (2006). "Do N95 Respirators Provide 95% Protection Level against Airborne Viruses, and How Adequate are Surgical Masks?" *American Journal of Infection Control* 34: 51-57.
2. Balazy, A., Toivola, M., Reponen, T., Podgórski, A., Zimmer, A. and Grinshpun, S. A. (2006). "Manikin-Based Performance Evaluation of N95 Filtering-Facepiece Respirators Challenged with Nanoparticles." *Annals of Occupational Hygiene* 50: 259-269.
3. Lee, B. U., Yermakov, M. and Grinshpun, S. A. (2005). "Filtering Efficiency of N95- and R95 Type Facepiece Respirators, Dust-Mist Facepiece Respirators, and Surgical Masks Operating in Unipolarly Ionized Indoor Air Environments." *Aerosols and Air Quality* 5: 25-38.
4. Rengasamy, S., Verbofsky, R., King, W. P. and Shaffer, R. E. (2007). "Nanoparticle Penetration through NIOSH-approved N95 Filtering-facepiece Respirators." *Journal of the International Society for Respiratory Protection* 24: 49-59.
5. OSHA Respiratory Protection Standard 29 CFR 1910.134.
6. NIOSH Respirator Certification Standard 42 CFR 84.



UNDERSTANDING, ACCELERATED

TSI Incorporated – 詳細については、ホームページ [www.tsi.com](http://www.tsi.com) をご覧ください。

米国 電話: +1 800 680-1220  
UK 電話: +44 149 4 459200  
フランス 電話: +33 4 91 11 87 64  
ドイツ 電話: +49 241 523030

インド 電話: +91 80 67877200  
中国 電話: +86 10 8219 7688  
シンガポール 電話: +65 6595 6388