

PM_{2.5} とマスク明星 敏彦^{1*}PM_{2.5} and MaskToshihiko MYOJO^{1*}

Received 29 July 2013

Accepted 11 September 2013

Abstract From January 2013, severe air pollution in Chinese cities including Beijing was reported and Japanese people were afraid of PM_{2.5} as a new toxic substance. JAAST provided the information about PM_{2.5} using the official homepage. People are very much concerned whether the commonly used masks are effective against PM_{2.5}. This article introduces health effect of aerosol inhalation, structures of surgical masks and dust respirators, performance of fibrous filters against aerosol particles, and fitness between masks and wears. In terms of effectiveness of masks, the fitness of masks is more important than the filter performance against aerosol particle inhalation.

Keywords : PM_{2.5}, Surgical Mask, Dust Respirator, N95, Respiratory Protection, Electrostatic Filter.

はじめに

2013 年当初から北京など中国各地でのひどい大気汚染がニュース映像で流れ、この大気汚染物質（PM_{2.5} 粒子）が日本に到達するのではないかと心配からマスクでも大きく取り上げられた。時期は冬で、多くの人が風邪予防のためのマスクを着用しており、PM_{2.5} 粒子とマスクを結びつける意見もマスクなどに取り上げられ、PM_{2.5} 粒子は微小でありマスクを通り抜けるといった専門家のコメントがしばしば引用された。マスクのみならず、エアロゾルのフィルタによる過捕集について誤解があるように感じた。これに対して日本エアロゾル学会ではホームページで PM_{2.5} 粒子に関する情報を提供し、PM_{2.5} 粒子の社会の認知度は向上したと思われる。マスクの有効性について、「マスクと日本人」¹⁾ という社会学者による著書に会い、日頃感じているとにかく日本人はマスクが大好きだということを

納得した。エアロゾルや労働衛生の関係の外国人を日本国内でお世話して、街中で「あのマスクはなに」という質問をしばしば受ける。さらに、「なぜ着用しているのか」、「あの着用で効くのか」という至極まともな質問で答えに困る。駅構内の工事業者がこのマスクを着用し、海外では普通の防じんメガネと耳栓またはイヤーマフをしていないことも質問された。本稿ではエアロゾルの捕集を目的とするいろいろのマスクとその性能について解説する。

健康とエアロゾル

冬から春にかけて、インフルエンザウィルス、花粉、黄砂とうれしくない訪問者がエアロゾルとして現れる。著者は、福岡県北九州市に生活しており、大陸の大気の影響を関東より感じる。Fig. 1 は、今年の 5 月の大学から約 8 km 先の皿倉山が大気じんで霞む風景を示している。近くの北九州市若松区の測定局で PM_{2.5} 粒子濃度が 90 µg/m³ の情報で撮影したが、この時刻では 77 µg/m³ であった。当地では小中学校の体育祭が 5 月の週末に開催されるが、PM_{2.5} 粒子濃度が高いことを理由に時期の変更を検討している。しかし、市内の廃棄物置場に野積みされた電子材料が発火して煙の出ている場合もあり、大陸ばかりが原因とはいえない。

Fig. 1 の日は黄砂現象ではないが、黄砂の出現も多

¹ 産業医科大学産業生態科学研究所労働衛生工学
(〒 807-8555 北九州市八幡西区医生ヶ丘 1-1)

¹ University of Occupational and Environmental Health, Institute of Industrial Ecological Sciences, Department of Environmental Health Engineering
1-1, Iseigaoka, Yahatanishi-ku, Kitakyushu 807-8555

* Corresponding Author.

E-mail: tmyojo@med.uoeh-u.ac.jp (T. Myojo)



2013/5/24 11:45
77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



2013/6/10 13:40
13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Fig. 1 Visibility at Kitakyushu, 2013 spring.

く、これがバックグラウンドのエアロゾルとなって、工場で作業環境中の粉じん（エアロゾル）を測定評価することが困難な日もある。また春先は花粉症の季節で、最近花粉もスギ、ヒノキなど樹種の予測に至っている。風邪やインフルエンザ、最近の風疹などウイルス感染による病気も空気を通して感染するといわれている。エアロゾルを見る場合、もっとも重要な因子は粒子の大きさであるが、スギ花粉は $20\ \mu\text{m}$ 程度、黄砂はピーク粒径で $3\text{--}5\ \mu\text{m}$ 、細菌は 0.5 から $10\ \mu\text{m}$ 、ウイルスは $0.02\text{--}0.25\ \mu\text{m}$ と幅広い²⁾。PM_{2.5} 粒子は燃烧生成物由来の粒子で実質的にサブミクロン粒子である。これらのエアロゾルへの対抗策はマスクと思う人が日本では多いが、先の著書¹⁾によると欧州ではそう思わない人が多数であると記している。

マ ス ク

マスクとして読者が思い浮かべるものも何種類があるので、本稿では Fig. 2 の左のような不織布を加工した四角い折り目（プリーツ）のあるものをマスクとし、ほかのマスクはそれぞれの名称で示す。業界団体である全国衛生材料工業連合会のマスクの表示・広告自主基準では「天然繊維・化学繊維の織編物または不織布などを主な本体材料として、口と鼻を覆う形状で、花粉、ホコリなどの粒子が体内に侵入するのを抑制、またかぜなどの咳やくシャミの飛沫が体内外に侵入、飛散するのを抑制することを目的に使用される、薬事法に該当しない衛生用品をいう。」と定義している。エアロゾルの捕集性能について特に規定はないが、表示する場合は、試験機関や試験方法を明示することとある。このマスクは、医療現場などで使用されているものが広く社会で使用されるようになった。

産業用の呼吸用保護具として、粉じん作業をする労働者をじん肺から守るための防じんマスクがある。防じんマスクには取り換え式と使い捨て式があり、同じく Fig. 2 の右に使い捨て式防じんマスクの例を示す。



マスク



使い捨て式防じんマスク

Fig. 2 An example of a mask (Surgical mask, left) and a dust respirator (DS2, right).

これは厚生労働大臣から指定されている登録機関（産業安全技術協会）がろ過捕集効率などの性能を試験し、合格標章のあるものを指す。溶接作業など労働安全衛生法に指定された作業では、この検定合格した防じんマスクを使用することが義務付けられている。

医療現場では、ほかに N95 マスクといわれるマスクが、結核患者など感染制御の必要な場所で用いられている。新型インフルエンザの流行した 2009 年春や、今回の PM_{2.5} 粒子でもマスクで捕集性能に不安であれば N95 マスクの使用というコメントがあった。実は N95 マスクは米国の国立労働安全衛生研究所が認証している防じんマスクの性能区分で、日本の防じんマスクの取り換え式の区分 RS2 と使い捨て式の区分 DS2 に対応する。しかしながら、N95 マスクは世界的に広く知られ、日本でも医療現場では N95 マスクが信頼され、東南アジアなど国によってはカップ型マスクの一般名称として N95 マスクと呼ばれている。N95 マスクを初めて着用された方はマスクに比べてとても息苦しいとい

う感想をもつ。

マスクのエアロゾルろ過捕集性能

防じんマスクは、日米とも捕集効率試験において、個数基準平均径が $0.1\ \mu\text{m}$ 程度の塩化ナトリウム粒子を試験エアロゾルとして捕集効率を測定し、粉じん負荷量が累積 $100\ \text{mg}$ （米国では $200\ \text{mg}$ ）になるまで捕集効率が規定の効率を割らないことを条件としている。RS2 と DS2 および N95 はそれぞれの認証機関で、捕集効率 95% 以上（区分 2）を保つことを確認している。日本の防じんマスクでは性能区分として、RS1 と DS1 の捕集効率 80% 以上（区分 1）、RS3 と DS3 の捕集効率 99.9% 以上（区分 3）がある。塩化ナトリウム粒子のほか、フタル酸ジオクチル粒子（オイルミストの代替）を用いる性能試験と区分もある。

マスクに対して同様の方法で捕集効率測定を行った結果が、新型インフルエンザの流行した 2009 年に国民生活センターの商品テストの報告

(http://www.kokusen.go.jp/test/data/s_test/n-20091118_1.html)

として示されている。結果として、N95 相当のろ過捕集性能のあるマスク、N95 と誤解するような表記ながら下回る性能の商品もあった。また 1 枚あたり 100 円を切るマスクは捕集効率が価格とともに低くなる傾向があるが、それ以上の値段の製品では性能は変わらなかったことが興味深い。

マスクの構造

マスクを鉋で切断するとその構造がわかる。Fig. 2 のマスクは Fig. 3 のように 3 層の不織布からなり、すべて異なる素材でできている。同様に使い捨て式防じんマスクを切断してみると 4 層の不織布からなっている。その中間の 2 層は厚みは異なるがマスクの中間の不織布と似ている。この部分を顕微鏡で撮影したものが Fig. 4 で、エアロゾル粒子をおもに静電気力で捕集するエアフィルタの役割を果たす。

静電気力により粒子を捕集する静電フィルタについ

ては木村³⁾ がまとめている。静電フィルタには異種の物質（繊維と粒子、または繊維と繊維）を混合・機械的に帯電させるタイプとポリエステルやポリプロピレンの繊維にエレクトレットと呼ばれる半永久電気分極を与えるタイプがある。代表的な静電フィルタとしてメルトブロー式不織布エレクトレットフィルタがあげられる。これはポリマーを溶融紡糸するときにノズルに高電圧を印加し帯電処理する方法で、電荷を帯びた溶融繊維が徐冷されエレクトレット状態となる。メルトブロー式不織布エレクトレットフィルタは、大量生産が可能で廉価であるためマスクや使い捨て式防じんマスクに広く使用されている。マスクメーカーはこのフィルタの原反を購入し、マスクに加工している。

はじめにも述べたようにエアフィルタは粒子を篩の目のように遮って捕集していると広く誤解されているが、Fig. 4 でもわかるようにエアフィルタの内部はかなり疎（空間が 90% 程度）でエアロゾル粒子は一本のフィルタ繊維の表面に静電気力などで捕集される。捕集されなかった粒子は次の繊維で同様のことを繰り返すので、フィルタの厚み（含まれる繊維の本数）が最終的にろ過捕集効率を決める。Fig. 3 に示すマスクと使い捨て式防じんマスクではフィルタの素材は似ているが厚みが大きく異なっていた。

マスク (MASK-1) と防じんマスク (DS-1 と DS-2) の粒径別の捕集効率を測定した結果の例を Fig. 5 に示す。図から、ここで試験したマスク (MASK-1) は防じんマスクに比べて性能は低いもののサブミクロンの粒子に対して 95% 以上の粒子捕集能力をもっていることがわかる。この結果も含め防じんマスクのナノからサブミクロンの粒子に対する粒径別の捕集効率については既報⁴⁾ で報告している。一般に、 $1\ \mu\text{m}$ より大きな粒子は慣性効果で、 $0.1\ \mu\text{m}$ より小さな粒子は拡散効果で捕集される。しかし、もっとも通過しやすい粒子の粒径はフィルタによって異なり、Fig. 5 で示すように静電気による粒子捕集を組み込んだフィルタでは、しばしばナノサイズの粒径でもっとも高い通過率を示す。これについては金岡ら⁵⁾、Kim ら⁶⁾ がフィルタと粒子

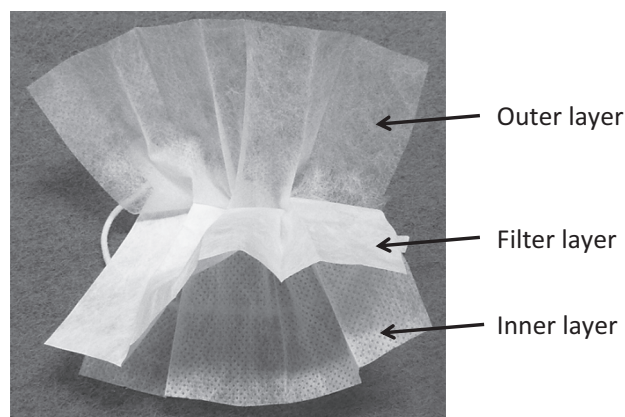


Fig. 3 Structure of a mask.

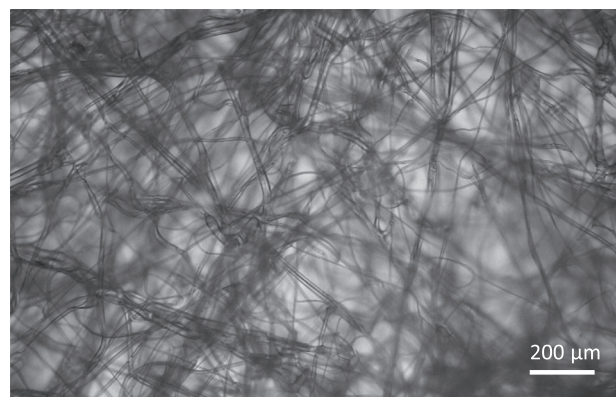


Fig. 4 Filter structure of a mask (x200).

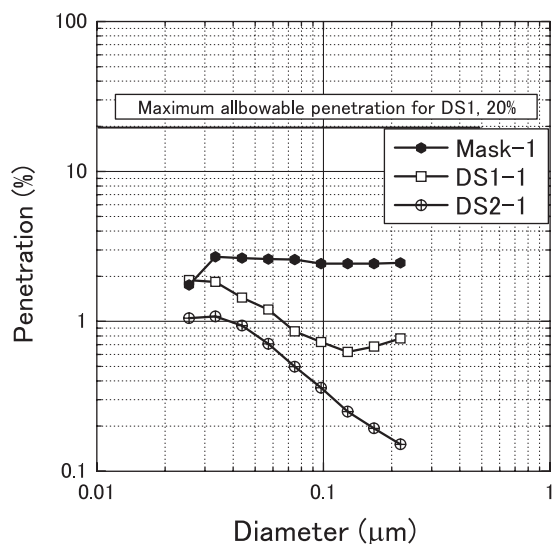


Fig. 5 Measured penetration of a mask and two dust respirators as examples.

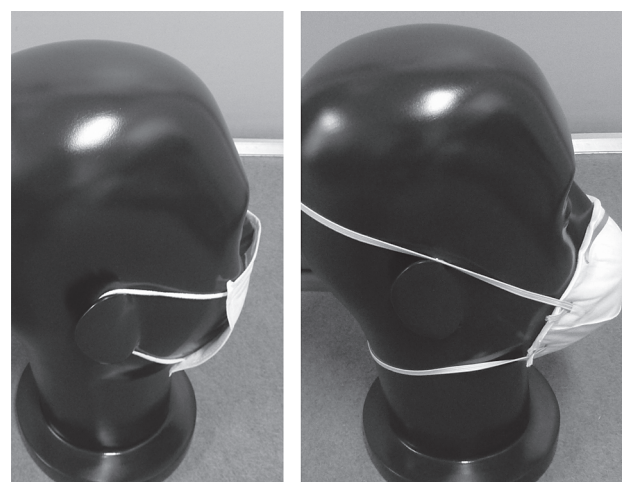
の荷電状態を制御して実験的理論的研究を行っており、無帯電の粒子ではもっとも通過しやすい粒径は $0.05 \mu\text{m}$ 程度であることを報告している。平衡荷電状態における無帯電粒子の割合は $0.1 \mu\text{m}$ で約 40%, $0.01 \mu\text{m}$ で約 90% であり、これらのフィルタの捕集効率に与える粒子帯電状態の影響は大きい。

したがって $\text{PM}_{2.5}$ 粒子は小さいのでフィルタの間を抜けるというコメントは間違いである。また粒子が小さいほど捕集効率は低いというのも誤解であるが、これらは学会としてエアロゾル粒子の動力学についての知識を今後啓発していく必要がある。

マスクの漏れ率

以上からマスクと使い捨て式防じんマスクの違いは静電フィルタの厚みだけと思われるかもしれない。マスクと使い捨て式防じんマスクの違いは形状から 2 点挙げられる。ひとつは、マスクはバンドを耳殻にかけるが、防じんマスクは後頭部で 2 本のバンドで固定していること (Fig. 6)、今ひとつは使い捨て式防じんマスクは型崩れしないように形状を保持しており、写真のものでは内側の皮膚に当たる層がカップ型の形状を保持していることである。防じんマスクを使用する場合、正しく着用できているか確認する漏れ試験装置があり、粉じん作業者の教育などで使用されている。漏れ試験装置を用いた経験では防じんマスクもバンドでしっかり固定しなければ漏れは大きい、耳掛けのマスクでは防じんマスクのようなしっかりした固定は難しい。

先のマスクの表示・広告自主基準では「本表示がフィルタ部の捕集効率の数値表示であって、マスク全体の性能を表すものではないことが消費者に明確に認識されるように表示すること。」とある。マスクに接する顔



マスク

使い捨て式防じんマスク

Fig. 6 Harness structure of a mask and a dust respirator.

の形状は複雑で、フィルタを通らずこの接顔部から空気が流入する（漏れる）とマスク着用の効果はない。特に小鼻が見えるような着用 (Fig. 6) ではフィルタの捕集効率の如何にかかわらずまったく効果はない。前述の国民生活センターの商品テストの報告でも平均の漏れ率は 40% 以上あった。防じんマスクも同様にフィルタの捕集効率が、ただちに呼吸保護の能力とはならない。防じんマスクではフィルタのろ過効率が 99.9% (区分 3) であっても期待できる呼吸保護は 90% (指定防護係数で 10) といわれている⁷⁾。

マスクは各自それぞれの流儀で着用しており、ここでは筆者の流儀を Fig. 7 に紹介する。真似していただいて構わないが、自己責任でお願いする。始めに①マスクを中心で二つ折りにし、下はホチキス留めにする。留める場所はマスクの大きさと各自の顔の大きさによる。②上下を引いて扇のように広げる。③上部の金属を折り鼻梁に合うように曲げる。④これを着用した後、⑤長さ 50 cm ほどの靴ひものような材質のひもを写真のように片方の耳の横から反対側まで通し、首の後ろでゴムバンドの力を加減しながら結ぶ。これによりマスクの下半分からの漏れは少なくなるが、鼻梁周辺からの漏れは残っている。いずれにしても防じんマスクが必要とされる場所でマスクを使用することはやめていただきたい。

ま と め

$\text{PM}_{2.5}$ 粒子からマスクに話を展開した。好ましくないエアロゾルを遮るため日本ではマスクがしばしば用いられる。社会的影響の大きなものとして感染爆発（パンデミック）があるが、2003 年の SARS（重症急性呼吸器症候群）、2009 年の新型インフルエンザ（N1H1 型）では医療関係者だけでなく一般でも感染防止にマスクを使用することがあった。マスクの着用が感染防止に有効かどうか議論になるが、「マスクと日本人」¹⁾ を読

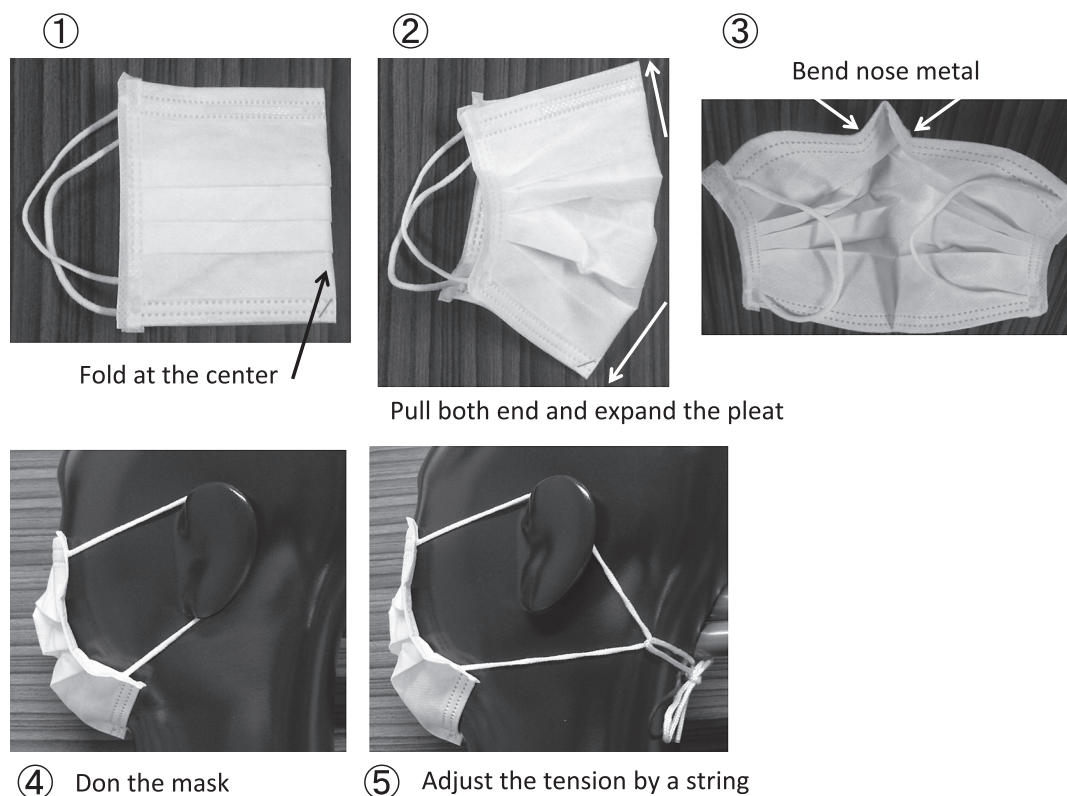


Fig. 7 Proposed usage of a mask.

むかぎりマスクの客観的な有効性は見当たらない。そこでは引用されていなかったが、2003年のSARS流行時に香港で医療関係者の感染に関する調査⁸⁾において、非感染者241名でマスクないしN95マスクを着用していた者は143名と60%であったが、感染者13名中にマスクまたはN95マスクを着用していた例はなかったという結果に筆者は少し希望をもっている。しかし、そのためには医療関係者並みにマスクやN95マスクをきちんと着用しなければならない。

References

- 1) Horii, M.: "Masuku to Nipponjin", Syumei Syuppannkai (2012) (in Japanese)
- 2) Glossary of Aerosol Science, ed. Japan Aerosol Science and Technology (2004) (in Japanese)
- 3) Kimura, K.: Electrostatic Fibrous Filter, *SEN-I GAKKAISHI*, **51**, 332–339 (1995) (in Japanese)
- 4) Myojo, T., Oyabu, T., Ogami, A., Morimoto, Y., Nishi, K., Kadoya, C., Yamamoto, M., Todoroki, M., Mizuguchi, Y., Lee, B.W., Hashiba, M. and Kambara, T.: Filtration Performance of Dust Respirators against Nanoparticles. *J. UOEH*, **33**, 163–171 (2011) (in Japanese)
- 5) Kanaoka, C., Emi, H., Otani, Y. and Iiyama, T.: Effect of Charging State of Particles on Electret Filtration, *Aerosol Sci. Technol.*, **7**, 1–13 (1987)
- 6) Kim, J. C., Otani, Y., Noto, D., Namiki, N. and Kimura, K.: Initial Collection Performance of Resin Wool Filters and Estimation of Charge Density, *Aerosol Sci. Technol.*, **39**, 501–508 (2005)
- 7) JIS T8150 Guidance for Selection, Use and Maintenance of Respiratory Protective Devices (2006)
- 8) Seto, W. H., Tsang, D., Yung, R. W. H., Ching, T. Y., Ng, T. K., Ho, M., Ho, L. M. and Peiris, J. S. M.: Effectiveness of Precautions against Droplets and Contact in Prevention of Nosocomial Transmission of Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS), *Lancet*, **361**, 1519–1520 (2003)