

マスクの安全を守る静電気技術

電気通信大学 特任准教授

石垣 陽 Yo Ishigaki

1. マスクの分類

我々が良く目にする使い捨てマスクを表1に分類する。この中で最も性能が高いのは防じんマスクであり、これは労働安全衛生法に基づき（公社）産業安全技術協会の国家検定試験を合格した製品のみ与えられる名称である。防じんマスクの国内規格としてはDS2（DS：Disposable Solid）が広く知られ、これは高性能マスクの代名詞となった米国規格のN95に相当する。N95のNは耐油性が無い（Not resistant to oil）ことを意味しており、95とは試験粒子に対する捕集効率が95%以上であることを意味する。国家検定品のマスクには、防じんマスクの他に有毒ガスを防ぐ防毒マスクもあるが、本稿では割愛する。

防じんマスクは元来、採掘や溶接など作業環境における有害な粉じん吸入を防止するために開発されたが、CDC（Centers for Disease Control and Prevention：米国疾病管理予防センター）が2005年に結核の空気感染予防に有効であることを示してから、医療現場でも積極的に利用されるようになった。本邦では、防じんマスク・防毒マスクを除くマスク（以下、一般マスク）については、規格や規制は特に存在せず、全国マスク工業会が試験方法や表示方法等を自主的に定めるに留まる。医療機器にも分類されていないため、製造・輸入・販売において薬機法上の規制もない。そのため一般マスクは、メーカーによって「マスク」「フェイスマスク」「サージカル

マスク」「衛生マスク」など様々な呼び方がある。なお米国では、サージカルマスク（surgical mask、外科用マスク）はASTM（American Society for Testing and Materials International：米国国際試験材料協会）規格に基づきFDA（Food and Drug Administration：米国食品医薬品局）が認証した製品のみ与えられる名称であり、その性能に応じてLevel 1-3に分類される。

2. マスクの性能指標


マスクの定量的な性能指標として、表1で挙げた「漏れ率」「捕集効率」「圧力損失」「人工血液バリア性」「難燃性」の5つが挙げられる。以下で順に説明する。

(1) 漏れ率

「漏れ率」とは、マスクを装着した状態で吸い込まれる空気のうち、マスクで濾過されず、肌とマスクの隙間等から漏れて吸入される量の割合を示す。一般マスクの場合、適切な指導を受けないと平均漏れ率は約86%であり、半数の被験者は漏れ率が100%だったとの報告もある¹⁾。これでは大半の外気を濾過せず吸入しているため、漏れ率を下げる事は非常に重要である。

防じんマスクでは、さらに漏れ率を下げるための工夫がなされている。例えば、後頭部まで回り込むゴムバンドによる密着性の向上、形状保持あるいは肌との接触面の工夫等

表1 一般市民が良く目にする使い捨てマスクの分類

分類	その他マスク	不織布マスク		防じんマスク	
			米国規格のサージカルマスク		
法規制、ガイドライン	なし（全国マスク工業会ではASTMに準じた自主規格を設けている）		Level 1-3に分類、FDA 認証	国家検定による（DS2、米 N95など）	
性能指標	漏れ率	適切な訓練無しには非常に高い（86%~100%）			極力低くなるよう設計
	捕集効率	BFE※1 相当で10-30%程度のもが多い	BFE 相当で70%~90%程度のもが多い	Level 1~3 BFE, PFE※2 共に≥95%~98%	DOP※3 または NaCl※4、DS2, N95では NaCl 捕集効率 ≥95%
	圧力損失	布マスクは通気性が低いものがある	製品によりバラツキがある	Level 1~3 <4.0~5.0 mmH ₂ O	DS2は吸気抵抗※5、排気抵抗※6 ≤70~50 Pa（排気弁有無による）
	人工血液バリア性	非常に低いものが多い	未評価のものが多い	Level 1~3 80~160 mmHg	各メーカーが独自の技術で性能を高めている
	難燃性	未評価の製品が多い		Class 1	
材料	ウレタン、布など目の粗い材料が主流	ポリプロピレン不織布に高電圧コロナ放電による帯電処理を行い、繊維にエレクトレットを形成することで、静電気力により微粒子の捕集効率を高めるのが一般的			

- ※1 BFE：Bacterial Filtration Efficiency（バクテリア飛沫捕集効率）、細菌を含む平均φ3μm試験粒子、試験流量28.3 L/min
- ※2 PFE：Particle Filtration Efficiency（ラテックス微粒子遮断効率試験）、平均φ0.1μmポリスチレン微粒子、通気線速度1~25 cm/sec
- ※3 DOP：フタル酸ジオクチル試験粒子、液体φ0.15~0.25μm、試験濃度≤100 mg/m²
- ※4 NaCl：塩化ナトリウム試験粒子、固体φ0.06~0.1μm、試験濃度≤50 mg/m²
- ※5 DS2吸気抵抗試験：試験流量85 L/min、試験時間：粒子が200 mg 供給されるまで
- ※6 DS2排気抵抗試験：試験流量40 L/min、試験時間：粒子が100 mg 供給されるまで

が挙げられる。JIS 人頭モデルを使った実験では、防じんマスクの漏れ率は国産マスクで約5~12%、輸入マスクで約8~27%程度とされる²⁾。

マスクの性能指標のうち「漏れ率」だけは使い方によって改善できる点が重要である。漏れ率が少なくなるようマスクを装着する作業をフィッティングという。漏れ率を確かめる方法として、着用者が自身で行える簡易的なユーザーシールチェックや、フィットテスターによる測定もある。マスクが全国民の必需品となった今、フィッティングに関する知

識向上が重要となっている。

(2) 捕集効率

「捕集効率」は、マスクのフィルターが持つ濾過能力を示す指標である。表1中に示した「BFE※1」「PFE※2」等の試験方法をマスクのパッケージで目にした読者も多いだろう。しかし「微粒子を99%除去」といった曖昧な表記がなされている製品もあり、注意が必要である。少なくとも試験に使用した粒子径と通気線速度を示さなければ、捕集効率の値は意味をなさない。実際にマスクを選定する際には、試験を行った機関の名称が表示されているか、また、その機関が実在し信頼できる所かどうか等も確認することが望ましい。全国マスク工業会では、ASTMの基準を参考にした独自の捕集効率試験を定めている他、パッケージや広告表示に関する自主規制も設けているので、同工業会のマークが表示されている事も、信頼性を判断する上での一つの目安となる。

(3) 圧力損失

圧力損失とは、マスクの素材がもたらす空気抵抗の大きさを意味する。通気性や、呼吸のしやすさを知る上での目安となる。圧力損失が大きくなる程、本来マスクを通るはずだった空気が顔との隙間に迂回してしまうため、漏れ率も大きくなる傾向にある。また捕集効率を上げるために単にフィルターを重ねると、その分、圧力損失も高くなり、結果として漏れ率が上がってしまう。このように、「漏れ率」「捕集効率」「圧力損失」は相互に関連するため、総合的な設計力が求められる。

(4) 人工血液バリア性、難燃性

一般マスクにおいてこれらの指標が評価されていることは稀である。一般的に不織布は撥水性があり水を通しにくく、布は水への濡れ性が高く水気を通しやすい。また材料によっては着火性が高いものもあるため、調理場やバーベキュー等の場で使用する場合には注意が必要といえる。

3. フィルターによる微粒子の濾過原理

図1は、マスクで良く使われる3種類のフィルターを電子顕微鏡で観察したものであり、拡大率はいずれの写真も等しい。図1 (a) は市販のウレタンマスク(スポンジ状のもの)であり、 $\phi 50 \mu\text{m}$ ほどの不規則な孔が多数並ぶ多孔質構造をしている。図1 (b) は日本政府が配布した布マスクであり、繊維の間に100~200 μm ほどの隙間が空いていることがわかる。図1 (c) はポリプロピレン (PP) 製の不織布であり、細い繊維がランダムに配

置されており、それらの隙間は数 μm 程と、最も目が細かい。

「粒子を濾過するためには、フィルターの隙間は粒子径よりも小さい必要がある」というのは良くある誤解である。空気中の微粒子を濾過する場合は、主に次の4つの力が働くことが知られている (図2)。

(1) 慣性衝突

微粒子の重さによって生じる慣性力により、気流から逸脱してフィルターの繊維に直接衝突することで濾過される。粒子径や比重が大きく、また通気線速度が遅いほど支配的となる傾向にある。

(2) さえぎり

粒子がフィルターの繊維に接触することで吸着される。フィルターの繊維が細く多くなるほど支配的になる傾向にある。

(3) ブラウン拡散

空気中の微粒子がブラウン運動によってラ

図1 マスクで使われるフィルター材料の電子顕微鏡写真

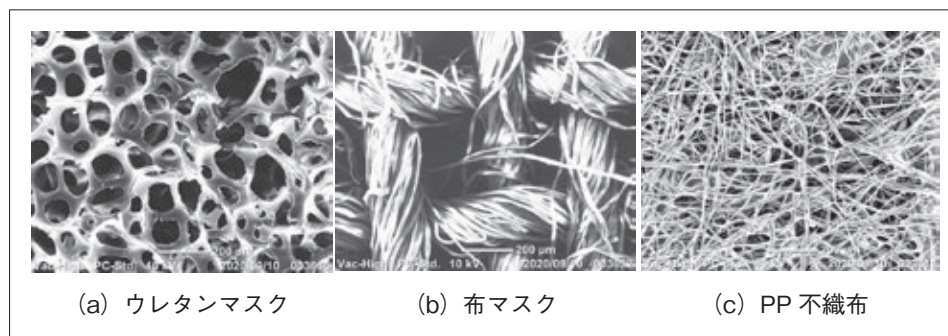
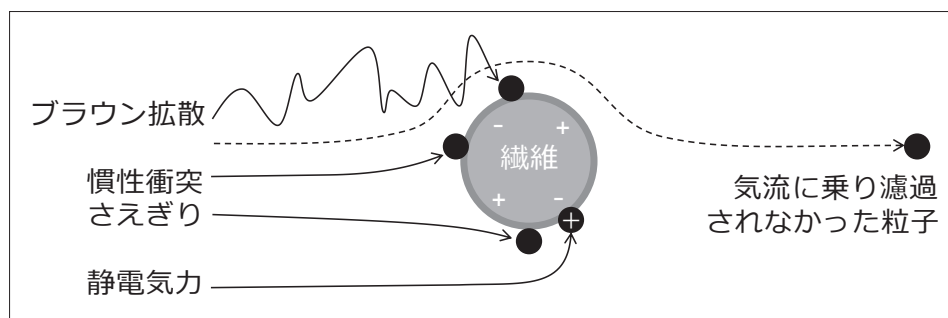


図2 フィルターが微粒子を濾過する仕組み



ンダムに動く事で繊維に衝突・接触し吸着される。サブミクロン以下の小さな粒子や、通気線速度が遅い場合に支配的になる傾向にある。

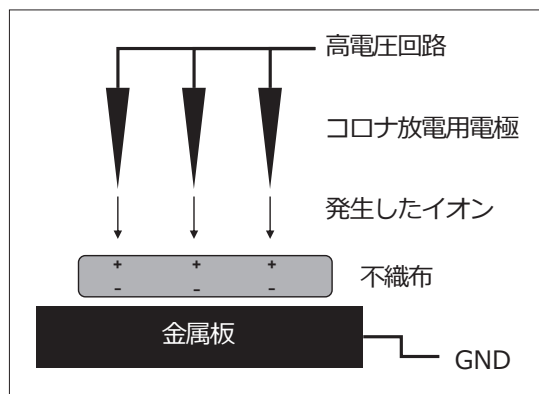
(4) 静電気力³⁾

繊維にエレクトレット（後述）を形成し帯電させることにより、静電気力によって粒子を吸着させる。+（-）に帯電した粒子は繊維の-（+）部に引き寄せられる。また帯電していない粒子も誘導分極により電荷を帯びて引き寄せられる性質がある。

4. コロナ放電とエレクトレットによる捕集効率向上

ポリプロピレン不織布を用いた殆どのマスクでは、材料繊維中にエレクトレットを形成することで静電気を帯びさせ、静電気力により捕集効率の向上を図っている。エレクトレット（電石）とは、半永久的に電気分極を保持する性質であり、磁石（マグネット）の電気版だと例えられる。エレクトレットの生成方法はいくつかあるが、高電圧のコロナ放電により発生したイオンでポリプロピレン繊維中に電荷を蓄積し、まるで「電荷の缶詰」のような状態を作り出す方法が広く知られている（図3）。エレクトレット加工された不

図3 ポリプロピレン不織布へのコロナ放電によるエレクトレット形成



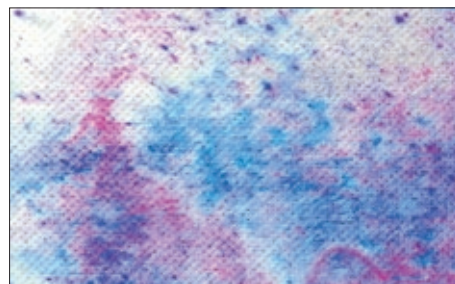
織布の表面に、赤と青のカラートナーの特殊な混合粉を散布すると、プラス帯電した部分には青色のトナー、マイナス帯電した部分には赤色のトナーが付着し、帯電状態を可視化することができる（図4）。

エレクトレットによる電気分極の度合いがより強く、また繊維の奥深くまでまんべんなく形成されるほど、静電気力による捕集効率は増大し、結果としてフィルターとしての性能が向上する。そのためマスク材料メーカーは温湿度、印加電圧・時間、雰囲気、電極の形状や配置、あるいは材料混合物等の諸条件について独自のレシピを持っているが、これらは企業秘密とされ、学術的に議論されることは少なかった。

5. オープンソースのマスク「オリマスク」の誕生

去る2020年4月頃、COVID-19のパンデミックを受けて、国内の医療機関を中心にマスクの深刻な品不足が発生した。そこで著者は、ゴールデンウィークまでの1カ月で純国産の高信頼マスクをオープンソースで開発し頒布する計画を立てた。開発期間とコスト削減のため、初期モデルは折り紙のようにDIYで組み立てる方式とし、「オリマスク」と命名した。オリマスクのWebページ（図5）では、不織布材料の調達方法、帯電加工の方法、性能試験の結果を全てオープンソースと

図4 不織布表面の帯電状態を可視化した例



（提供：春日電機株式会社）

して公開し、製造に参加してくれる事業者も募った。その結果、複数の事業者から参加のオファーがあり、1枚29円～という当時としては非常に低価格で販売を開始でき、これまで10万枚以上が頒布された。

当時、フィルター用のメルトブローン不織布（溶融した樹脂を熱風により綿飴のように吹き飛ばして生成、繊維径が細くエレクトレット加工済）は殆どが中国で製造され、国内では入手困難だった。そこでオリマスクでは、入手性の高い国産のспанボンド不織布（樹脂を溶出紡績して生成、メルトブローンと比べて非常に短時間で製造可能）を採用した。しかしспанボンド不織布はエレクトレット加工がなされていないため、コロナ放電の電圧や温度条件の適切な組み合わせを実験し、その結果も全て公開した。例えば図6

は、コロナ放電時に材料を加熱することで、 $\phi 0.3 \mu\text{m}$ の粒子に対する捕集効率を未処理時の50%以下から80%以上に高められることを示している。また洗濯等により帯電が弱まってしまった場合でも、PPと帯電列が遠いナイロン製の歯ブラシ等でこすって摩擦帯電させる方法も提案した。

6. まとめ

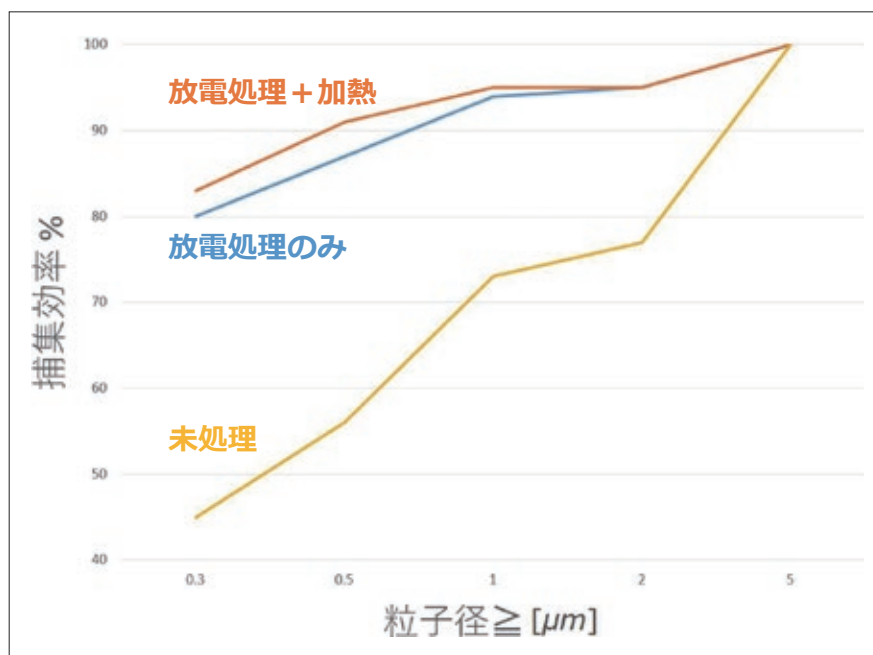
一枚のマスクの背後には多くの技術が集積されている。昨今、アパレル等の異業種や技術系ベンチャーが新しいマスクを次々と提案している。使い手側もリスクに応じた適切な使い分けや、正しいフィッティングができるよう、マスク・リテラシーを高めておく必要があるだろう。マイクロプラスチックの実態

図5 オリマスクのWeb ページ



(<https://www.orimask.org>)

図6 スポンボンド不織布へのコロナ放電による捕集効率向上の例



が報告⁴⁾されたが、マスクのPP素材は海洋汚染の原因にもなり得るため、正しい廃棄方法の啓蒙活動や、3R (Recycle, Reuse, Reduce) に着目したマスクの技術革新も求められる。

オリマスク開発の様子はNHK EテレのETV特集「マスクが消えた日々～医療現場をどう守るのか～」でも密着取材されるなど、注目を集めた。筆者はかつて、福島第一原発事故直後にオープンソースの放射線測定器「ポケットガイガー」(www.radiation-watch.org)を開発した経験からも、市民科学を生かした災害時のクライシス・コミュニケーションの重要性を実感している⁵⁾。危機発生時に市民と科学者が自律適応的に協力し議論できる素地を築いておく事で、今後起こり得る様々な環境災害を乗り越える事が出来ると信じている。

- 4) 蓑島 浩二, 浦垣 充朗: 横浜市におけるマイクロプラスチックの実態調査, セイフティエンジニアリング, 47 (2), 199, 10-15, 2020.
- 5) 環境・福祉分野におけるスマートセンシング調査研究委員会 監修: スマートセンシングの基礎と応用, 3.8 参加型の放射線モニタリング事例, シーエムシー, 2017.

参考文献

- 1) 大西 一成: マスクの品格, 幻冬舎メディアコンサルティング, 2019.
- 2) 黒須 一見ほか: 各種 N95微粒子用マスクの漏れ率に関する基礎的研究, 日本環境感染学会誌, 26 (6), 345-349, 2011. <https://doi.org/10.4058/jsei.26.345>
- 3) 木村 一志: 静電フィルターの機能と応用, 繊維学会誌, 51 (8), 332-339, 1995. https://doi.org/10.2115/fiber.51.8_P332

いしがき ● よ

博士 (工学、電気通信大学)、修士 (芸術、多摩美術大学)。セコム株式会社IS研究所を経て現職。手のひらサイズの測定器で放射線、PM2.5、三密 (CO₂) など様々な環境汚染を可視化し、市民の行動変容を促す社会実装を得意とする。眼科用医療機器の日本インドでの普及や、多数のアートプロジェクトへ技術協力も行う異色のデザイン・エンジニア。人類のためのデザイン研究室 (www.design4humanity.com) を主宰。