

昆虫のグルーミングから学ぶマイクロコームの開発

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

細田 奈麻絵

The objective of this study is to develop a cosmetic tool, designated 'microcomb', that can efficiently remove pollen from Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*), Japanese cypress (*Chamaecyparis obtuse*), and other plants that adhere to skin and hair and are difficult to remove. This tool is intended as a measure against hay fever, for which there is a high social demand. Pollen from plants such as Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*), Tall goldenrod (*Solidago altissima*), and Japanese hop (*Humulus japonicus*), which are associated with the causation of hay fever, have been measured to have an approximate size of 20 to 30 μm . Observations were made of the attachment of pollen of similar size, as well as the grooming behaviour and characteristics of the hairs (combs) used for grooming in bees (*Bombus diversus diversus*, *Apis cerana japonica*, *Apis mellifera*) and flower chafers (*Eucetonia pilifera*), and the attachment patterns and grooming methods of these were clarified. On the basis of these observations, an artificial microcomb was designed and successfully produced.

1. 緒言

本研究の目的は、社会的な要請が高い花粉症対策として、皮膚や毛などに付着して取り除きにくいスギ・ヒノキなどの花粉を効率的に取り除くことのできるコスメツールとして「マイクロコーム」を開発することである。その仕組みには、ミツバチが粘着性物質で付着し取り除きにくい花粉を、脚にあるマイクロコームを使いきれいに取り除くグルーミングを応用する。既存のコスメ商品には、毛を剃って花粉を一緒に除去するものがあるが、本研究は花粉のみをきれいに除去するマイクロコームの開発を目的にしている。これによりカミソリに敏感な肌にも対応でき、多様な消費者ニーズへの対応が可能となる。

ミツバチが花粉を収集・除去する「グルーミング」行動は、1970年代より詳しい調査¹⁻³⁾が行われたが、その他の昆虫の詳細なグルーミング調査はあまり行われていなかった。花粉には多様なサイズや形状があり、昆虫ごとのマイクロコームの特徴と、生息環境の花形状の関係を調査することで、アレルギーを起こす特定の花粉に効果的な人工マイクロコームの開発が可能となる。花粉のサイズ(20~40 μm)は、メイクアップ化粧品の粒子サイズと比較して大きいと、メイクアップ後の選択的な花粉除去効果も期待できる。

2. 方法

本研究では、対象となる昆虫と、生息環境の花粉を採取し、形状・サイズの特徴及び花粉を収集・除去する「グルーミング」行動を観察する。「人工マイクロコーム」は、昆虫観察の結果をもとに形状・サイズを設計し、レーザー加工で鋳型を作る手法を用いて製作する。

2.1. 昆虫と花粉の採取

花粉が昆虫にどのように付着し、除去されるかを調べるため、昆虫の生息環境における花粉を採取し、4種類の昆虫について花粉の着脱を観察する。

2.1.1. 昆虫の採取

対象とした昆虫は、つくば市の野原に生息しているものである。①トラマルハナバチ(ハチ目(膜翅目)ミツバチ科)は、つくば市の草原(コスモスの花の上)から採取した。②ニホンミツバチ(ハチ目(膜翅目)ミツバチ科)と③セイヨウミツバチ(ハチ目(膜翅目)>ミツバチ科)は、一部はコセンダングサの花の上から採取した。なお、セイヨウミツバチ及びニホンミツバチは沢辺養蜂場(つくば市)においても採取した。④ハナムグリ(甲虫目カブトムシ亜目コガネムシ科)は、牡丹園(つくば市)ならびに草原で行動観察及び採取を行なった。

2.1.2. 花粉の採取

上述の昆虫の生息環境において、次の草花の花粉を採取した。①コスモス(キク科コスモス属)、②コシロノセンダングサ(キク科センダングサ属)、③セイダカアワダチソウ(キク科アキノキリンソウ属)、④カナムグラ(アサ科カラハナソウ属)、⑤スギ(スギ科スギ属)、⑥ウメ(バラ科サクラ属)、⑦シャクヤク(ボタン科ボタン属)、⑧ボタン(ボタン科ボタン属)。いずれもつくば市内で花粉を採集し、形状・サイズを観察した。



Development of microcombs learning from insect grooming

Naoe Hosoda

National Institute for Materials Science

2. 2. 昆虫の行動解析と電子顕微鏡観察

2. 2. 1. 昆虫の行動解析 (グルーミング)

昆虫が花粉を集めたり、除去したりする行動 (グルーミング) は、ハイスピードマイクロスコープ (VW-9000, 株式会社キーエンス) を用いて観察した。撮影速度は 30 fps から 230000 fps まで高速度撮影が可能である。

2. 2. 2. 花粉と昆虫の電子顕微鏡観察

花粉及び昆虫の毛、コーム、脚の形状観察は、走査型電子顕微鏡 (SEM) (Su-5000, 日立ハイテク) を用いて観察を行った。真空中での乾燥による変形を避けるため、SEM のステージ温度をマイナス 20℃～マイナス 30℃に冷却して観察した。

2. 3. 人工マイクロコームの開発

2. 3. 1. 人工マイクロコームの設計・試作

行動解析及び SEM 観察の結果をもとに、「人工マイクロコーム」の形状とサイズを設計した。人工マイクロコームの製作は、鋳型を作成して樹脂を流し入れた。なお、鋳型

の作成は、材料にテフロン、シリコンウエハを用い、フェムト秒レーザー加工機により表面加工を行って作成した。

2. 3. 2. 花粉除去の評価

人工マイクロコームによる花粉除去効果は、メイクアップした人工皮膚に花粉を付着させて調べた。メイクアップした人工皮膚は、人肌ゲルを用いてファンデーションを塗布して用意した。そこにアルソトロメリアの花粉 (大きめの花粉) を付着させ、人工マイクロコームで表面を滑らせて、除去前と除去後の SEM 像を比較して除去効果を調べた。

3. 結果及び考察

3. 1. 花粉の形状観察

対象昆虫の生息環境における花粉の形状観察の結果を表 1 にまとめた。図 1 には電子顕微鏡像を示す。コスモス、コシロノセンダングサ、セイダカアワダチソウなどの花粉サイズは 20 μm～30 μm 程度で、棘 (2 μm～4 μm 程度の長さ) があつた。カナムグラは測定前の乾燥による変形が生じていたが花粉サイズは直径 26 μm 程度であつた。スギ

表 1 花粉の形状観察結果

	長直径 μm	短直径 μm	球形 μm	棘の高さ μm	棘の幅 μm
①コスモス	33.1 SE: ±0.6	23.9 SE: ±0.3	23.8 SE: ±0.5	4.20 SE: ±0.18	1.94 SE: ±0.08
②コシロノセンダングサ	33.5 SE: ±0.6	27.1 SE: ±1.0	27.98 SE: ±0.4	4.24 SE: ±0.09	2.39 SE: ±0.05
③セイダカアワダチソウ			19.0 SE: ±0.4	2.49 SE: ±0.09	2.08 SE: ±0.04
④カナムグラ			25.9 SE: ±1.0		
⑤スギ			30.0 SE: ±0.2		
⑥ウメ	45.9 SE: ±0.4	23.9 SE: ±0.6			
⑦シャクヤク	45.3 SE: ±0.6	22.7 SE: ±0.6			
⑧ボタン	48.6 SE: ±1.0	21.8 SE: ±0.5			

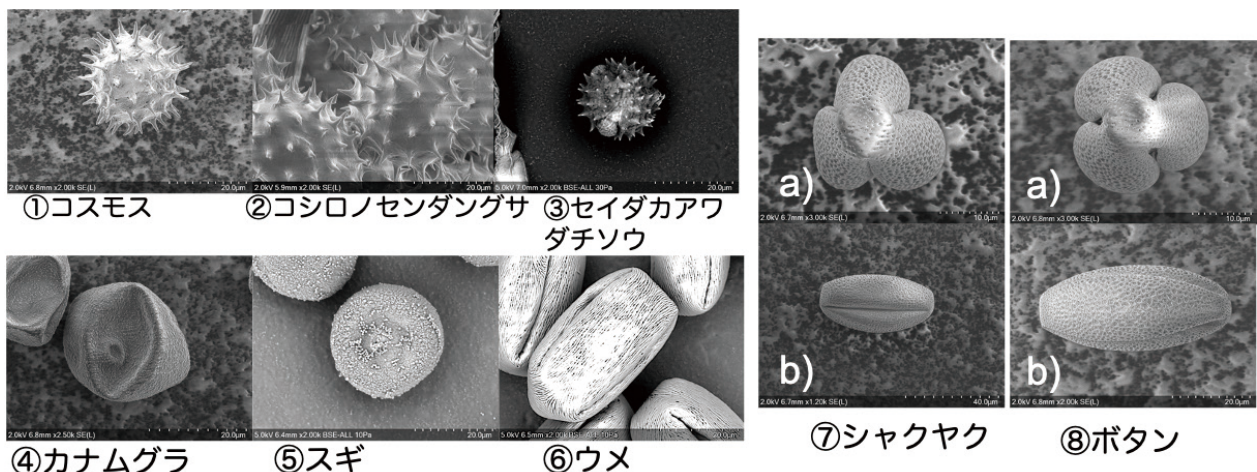


図 1 花粉の電子顕微鏡

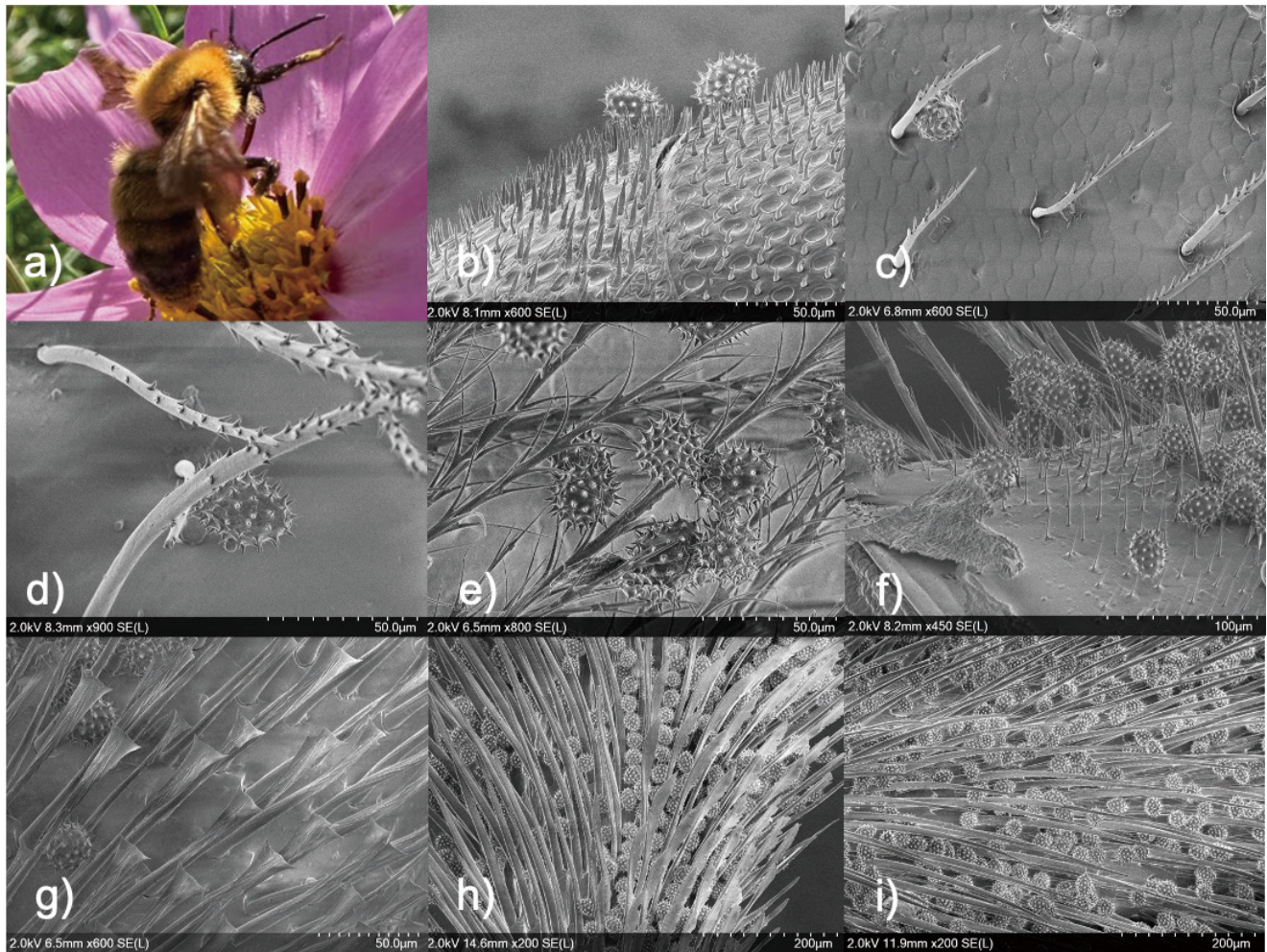


図2 花粉の電子顕微鏡

の花粉サイズは、直径 $30\mu\text{m}$ であった。ウメ、シャクヤク、ボタンの花粉サイズは、縦長方向 $45\mu\text{m} \sim 49\mu\text{m}$ 程度で断面方向は直径 $22\mu\text{m} \sim 24\mu\text{m}$ であった。

3. 2. 花粉の付着機構

3. 2. 1. トラマルハナバチの花粉付着 (体表の様々な毛への付着)

ハチは、体表に複数の異なった形状の毛を持つ。図2に特徴的な毛の構造と花粉がついている様子を示した。図中のa) はトラマルハナバチがコスモスに留まっている様子である。b) はアンテナ表面に生えている毛で、短く針のような形状をしている。c) とd) は頭部に生えている毛で、c) は毛の片側のみに細かい毛があり、d) は細長い毛の表面に細かい棘がある構造をしている。e) は胸部に生えている毛で、枝分かれした構造をしている。枝分かれした細い毛の先端に花粉がたくさん付着していた。f) は腿節に生えている毛で、長い毛の下に細く小さい毛が生えている。g) とh) は脛節に生えている毛で、g) の毛は先端がヘラの形状をしており、h) は先端が鳥の羽のような形状をし

ている。i) は基跗節内側に生えている毛で、くし (コーム) の役割があり毛の間にたくさんの花粉を貯めている。

花粉は、毛がない場所にはあまり付着しておらず、細い毛の先端に付着している様子が見られた。細い毛につくことで接触部分を減らすことにも成功しており、花粉の回収しやすさに役立っているものと考えられる。

3. 2. 2. ハナムグリの花粉付着

ハナムグリはボタンとシャクヤクの花の上での行動している様子を観察した。ハナムグリは体全体的に花粉を付着させているが、特に体の裏側に大量の花粉を付着させていた。花粉や蜜を食べた後、花粉を付着したまま花から飛んで移動するため、グルーミングの様子はハナムグリを容器に入れて観察した。脚を用いてグルーミング行動が見られた。また、飛翔と容器への衝突によって花粉がかなり落下する様子が観察された。ハナムグリの毛はハチと比べて毛の密度も低いなど、花粉が落下しやすいものと考えられる (図3)。

3. 2. 3. 人毛への花粉付着

人の眉毛に付着した花粉の様子を図4a) に示した。図4b) は付着している部分を拡大したSEM像である。花粉

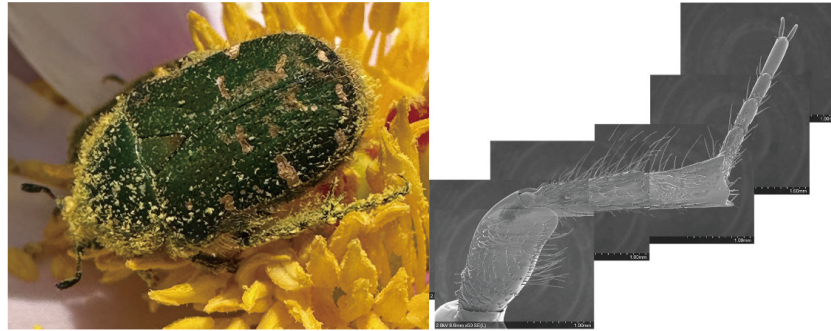


図3 左はシャクヤクの花の上にいるハナムグリ、右は後脚の電子顕微鏡。ハチと比べると脚の表面の毛の密度が低い。

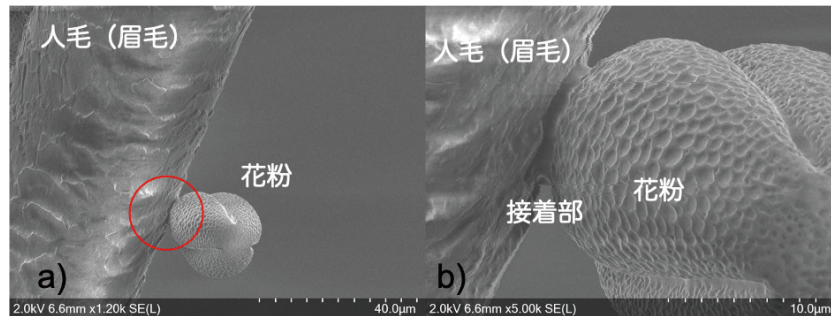


図4 a) 人毛(眉毛)に付着した様子とb) 接着部の拡大写真

と人毛が、粘性液体により固定されている様子が観察できた。

3.3. 花粉の収集・除去機構(トラマルハナバチのコーム形状)

昆虫は自身のコームを用いて、花粉を集めたり、除去したりしている。対象としている花粉サイズに注目して、昆虫のコームについて調べた。

3.3.1. 跗節のブラシ

トラマルハナバチは、跗節に針形状の毛が生えている。基跗節の先端部は、根本が太く先端に行くほど細い形状の毛が生えている。後脚基跗節先端部分の毛は根本が平均値で直径 $29.9\mu\text{m}$ 、中間の太さが $19.8\mu\text{m}$ 長さが $301.3\mu\text{m}$ である。最先端部分の多くは破損した様子が見られた。毛の間隔は、 $19.6\mu\text{m}$ であった。隙間は、花粉サイズよりも小さいことが分かった。基跗節内側の毛は、上述の毛よりは細く、毛の中間位置の太さは直径が $14.4\mu\text{m}$ で毛の間隔は $37.1\mu\text{m}$ であり基跗節先端部の毛に比べると密度が低い。

3.3.2. 脛節の内側の毛

脛節の内側の毛は、跗節に生えている毛とは異なった形状をしていた。先端がヘラのような形状のものや鳥の羽のような形状のものが存在していた。ヘラ先端の幅は $16.8\mu\text{m}$ で長さは $140.4\mu\text{m}$ で、毛と毛の間は $35.4\mu\text{m}$ であった。

3.3.3. 脛節のレーキ

脛節の先端部分にはレーキと呼ばれる構造がある。根

本の太さは $31.2\mu\text{m}$ で中間位置での隙間は $22.2\mu\text{m}$ 長さは $163.6\mu\text{m}$ である。

3.3.4. 前脚のアンテナクリーナー

アンテナ(触覚)クリーナーは、開口部が約 $275\mu\text{m}$ で、アンテナの直径約 $298\mu\text{m}$ (アンテナ上の毛を含めた直径)に適したサイズになっている。クリーナー先端は長方形の上が三角形の形をした構造が並んでいる(図5f)。長方形の幅は $6.8\mu\text{m}$ 、長さ $51.0\mu\text{m}$ 、隙間が $1.7\mu\text{m}$ であった。先端部分は、アンテナ上の毛のサイズに合った構造であった。

3.3.5. 花粉の集取・除去行動(グルーミング)

昆虫のグルーミングは、主に跗節や脛節の内側にあるクシや脛節にあるレーキなどを使って行われている。図6にハイスピードカメラで撮影した腹部グルーミングの様子を示す。

腹部の背面のグルーミングは、後脚の跗節・脛節の内側を背側から腹側に向かって動かしている(図6)。アンテナのグルーミングは前脚の脛節と跗節でアンテナを挟み、アンテナクリーナーを使って付け根から先端へと擦ることで行われた。図5にグルーミングの様子とアンテナクリーナーの電子顕微鏡像を示した。翅のグルーミングは、腹部や後脚の跗節や脛節のブラシを使い、翅の外側を付け根側から先端へ擦っている。胸部のグルーミングは、中脚の脛節と跗節を使い、胸部を腹部側から頭部側へ繰り返し擦って行われた。脚部は同側、または両側の脚を擦り行っている。

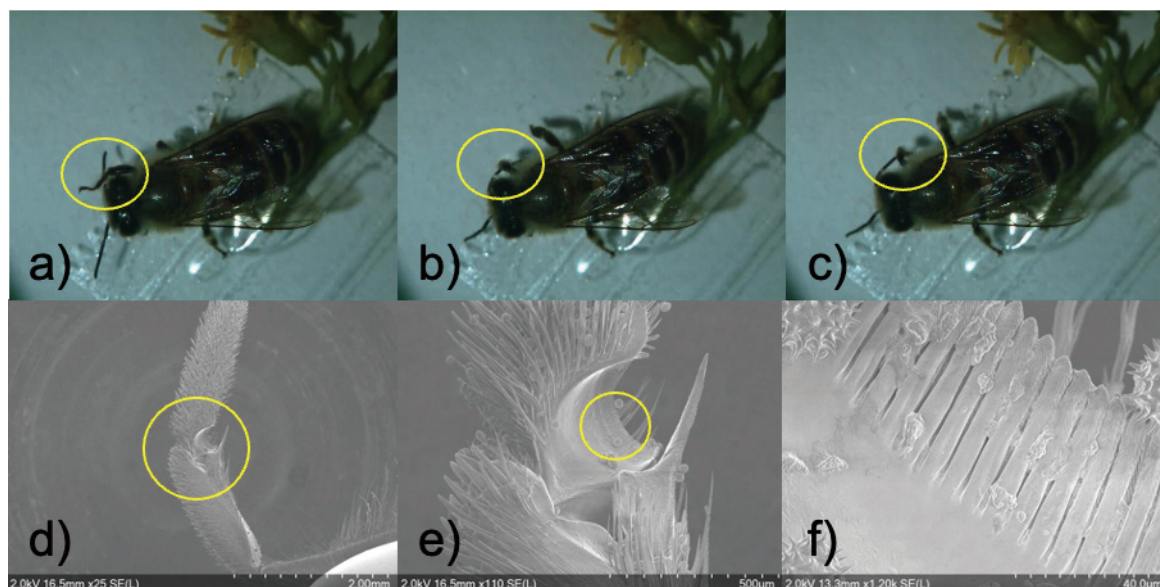


図5 アンテナのグルーミング (a-c) とアンテナクリーナー (d-f)



図6 セイヨウミツバチの腹部（背側）グルーミングの様子。後脚の跗節・脛節の内側を背側から腹側に向かって動かしている。

3.4. 人工コームの製作

3.4.1. 設計・製作

本研究では、直径が20～30 μm サイズの花粉の除去を目的として、前脚のアンテナクリーナーをモデルに人工マイクロコームを設計した。製作には、フェムト秒レーザー加工機を用いてテフロン基板及びシリコンウエハー表面を加工し鋳型を用いた。

まず、テフロン基板上に幅20 μm 、長さ50 μm 、深さ10 μm の形状を2 μm の隙間を開けて加工を行ったが、テフロン基板表面の凹凸が加工の妨げとなり、樹脂を挿入しても綺麗な形状を作ることができなかった。

そこで、表面が平坦なシリコンウエハーを用いて加工を行った。この加工は、直径20 μm の穴を2 μm の隙間を開けて加工したが、レーザー照射によるシリコン基板温度の上昇で基板表面が粗くなる問題が生じた。この対策として、レーザーを移動させると表面の荒れが抑えられ綺麗な溝が形成されることから、線状の加工を行なった。この鋳型に樹脂を注入し、これを剥がすことで間隔20 μm 高さ30 μm の形状の人工マイクロコームが製作できた（図7参照）。

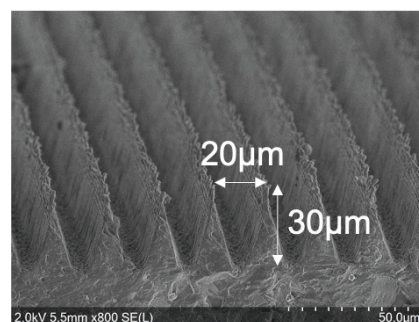


図7 人工マイクロコームの電子顕微鏡。レーザー加工した鋳型に樹脂を注入し、高さ30 μm 、間隔20 μm の形状の人工マイクロコームが製作できた。

3.4.2. 人工コームの評価

人工マイクロコームの花粉除去効果は、人工皮膚に花粉を塗布したサンプルで調べた。人工皮膚は人肌ゲルにファンデーションを塗布したものを用い、マイクロコームで表面を撫でて、除去前と除去後の電子顕微鏡像を比較して花粉の除去効果を調べた。使用した花粉は、大きいサイズに分類される市販のアルトロメリアの花粉（サイ

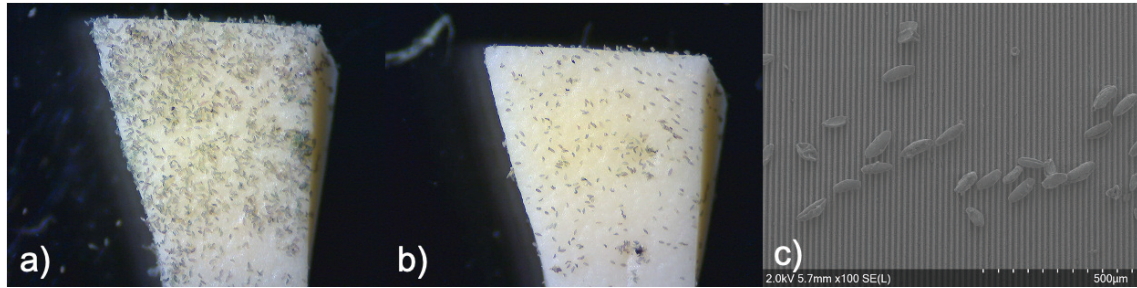


図8 人工マイクロコームによる花粉除去

- a) 花粉の除去前。人工皮膚（人肌ゲル上にファンデーション塗布）に花粉を付着。
b) 花粉の除去後。人工マイクロコームで表面を撫でて花粉を除去した後。
c) 花粉除去後の拡大SEM像。大きなサイズの花粉が確認できる。

ズ；136 μ m）を用いた。今後、直径が小さいサイズ（20～30 μ m）の花粉についても除去効果を調べる計画である。

図8に人工マイクロコームによる花粉の除去効果を示す。図中のa)が人工皮膚上に花粉（アルソトロメリア）を付着させた状態、b)がマイクロコームで表面を撫でた後で、多くの花粉が除去されたことが確認できる。一方、一部の花粉が除去されずに残っている。図c)は残った花粉を電子顕微鏡像で拡大したものである。多くの花粉は人工マイクロコーム側に移動したが、一部が残った原因として花粉サイズがコーム構造よりも大きいことが考えられる。すなわち、花粉サイズが大きく異なる場合にも、花粉サイズに合わせて人工マイクロコームのサイズを最適化することで、特定の花粉の除去効率を高める人工マイクロコームを設計できることを示唆している。ハチの表面観察において、大きな花粉の付着が見られなかったことから、今後は、季節や花の種類の異なる環境での観察を行い花粉サイズと昆虫のグルーミング用の櫛サイズの関係进行调查することが有効であると考えられる。

4. 総括

4.1. 主な成果

昆虫が花粉を付着・除去させる形状と行動（グルーミング）に着目し、昆虫とその生息環境に存在する花粉を採集して観察を行った。この観察結果をもとに「人工マイクロコーム」を設計し、製作に成功した。主な成果は次のとおりである。

- 1) 昆虫とその生息環境の花粉を採集し、形状・サイズを調査した。昆虫が花粉を付着・除去させる行動（グルーミング）の観察をもとに「人工マイクロコーム」を設計できた。
- 2) 「人工マイクロコーム」は、レーザー加工で鋳型を作る手法で製作に成功した。花粉除去の効果を人工皮膚に対して確認した。花粉サイズに合わせた最適化も可能である。

4.2. 今後の計画

次のステップでは、小さいサイズの花粉除去効果について人工マイクロコームを評価する。花粉症を引き起こすスギ、カナムグラ、セイダカアワダチソウなどの花粉はサイズが20～30 μ m程度である。このサイズに最適化した人工マイクロコームを製作する。また、人工皮膚での評価について「毛のある人工皮膚」での花粉除去効果を測定する。昆虫ごとのマイクロコームの特徴と、生息環境の花粉形状の関係についてもさらに調査したい。

本研究の成果により、社会的な要請が高い花粉症対策として、皮膚や毛などに付着して取り除きにくいスギ・ヒノキなどの花粉を効率的に取り除くことのできるコスメツールとして実現する可能性が見出された。

謝辞

本研究を推進するにあたり、御援助を賜りました公益財団法人コーセーコスメトロジー研究財団に深く感謝申し上げます。

(引用文献)

- 1) Rudolf Jander, Grooming and pollen manipulation in bees (Apoidea) the nature and evolution of movements involving the foreleg, *Physiological Entomology*, 1 (3), 179–194 (1976)
- 2) Rudolf Jander and Ursula Jander, Wing grooming in bees (APOIDEA) and the evolution of wing grooming in insects, *J. of the Kansas Entomological Society*, 51 (4), 653–665, 1978
- 3) Guillermo J Amador, Marguerite Matherne, D'Andre Waller, Megha Mathews, Stanislav N Gorb and David L Hu, Honey bee hairs and pollenkitt are essential for pollen capture and removal, *Bioinspiration & Biomimetics*, 12, 026015, 2017