

羽毛の微小水滴に対する濡れ挙動解明と模倣構造による高効率な霧収集への応用

名古屋工業大学 工学研究科 工学専攻

石井 大佑

1. はじめに

近年、気候変動や人口増加による農業・工業用水の需要拡大が、世界的な水不足を引き起こしている。更に、水不足に伴う砂漠化や川や湖などの水源を巡る紛争、衛生的な水の不足が危惧されている。そこで、川や湖とは別の水源として霧に着目し、水不足の解決を図る研究が注目されている。

そこで本研究は、鳥の羽毛の微細構造に着目し、高効率な水分捕集材料の開発を目指す。羽毛の微細構造は、雨や霧、雪など様々な環境下で、電気などの外力を加えずとも、風圧のみで自動的に弁を開き通気量を調節している。このメカニズムを模倣した材料は、安定性、利便性に優れ、省エネルギーな流量制御ができると考えられる。本研究の目的は、羽毛の微小水滴に対する濡れ性の解明と、高効率な水分捕集への展開である。今までに羽毛のような微細構造を作製した研究例は無く、本課題は新規性の高い独創的な試みである。

また、霧や雲のような微小水滴と生物表面との動的濡れ性の相関関係は、鳥類以外の多くの生物においてもあまり調べられていない。そのため、微小水滴に対する動的濡れ性の相関は、今後の重要な研究対象になり得る。本研究は、水不足の解消を目指した生物模倣技術の先駆けであり、動的濡れ性を指標とした液体操作技術の先導的な研究であると言える。

2. 羽毛の濡れ挙動についてのこれまでの研究

ここでは、羽毛の濡れ挙動についてのこれまでの研究を紹介する。鳥は霧や雲の中を飛べるので、羽毛に微小な水滴が漂う環境で飛行能力を維持する機能があると考えられる。したがって、微小な水滴に対する羽毛の濡れ性を調べることは重要である。しかし、先行研究は、羽毛の微細構造よりも大きな水滴の接触角で濡れ性を結論づけてしまい、微小水滴の濡れ性は調べられていない¹⁾。濡れ性は液滴サイズによって大きく異なるため、本研究は羽毛の濡れ性を見直すために意義のある試みである。また、鳥類と霧との関係を調べた研究は少なく、報告された研究例のほとんどが、渡り鳥の気象条件と飛行頻度関係についての研究であった²⁾。これらの生物行動学の研究は、羽毛の濡れ性に言及を持ち込むことは稀である。しかし、鳥類は種によって羽毛の微細構造や油分の量が異なり、これらが鳥の行動に違いをもたらす可能性は大きい。今後、多様な種の微小水滴に対する羽毛の濡れ性を調べることで、鳥類の霧に対する行動の違いを明確にすることも可能である。

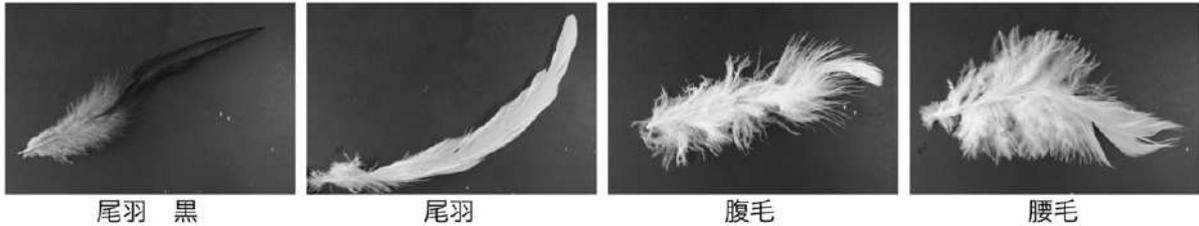
したがって、高効率水分収集を実現するためには、羽毛の濡れ挙動を解明する必要がある。

3. 様々な種の羽毛の構造解析

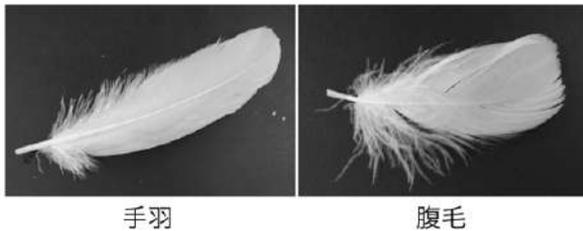
最初に、様々な種の羽毛の走査型電子顕微鏡（SEM）観察を行った。鳥の羽毛の微細構造は種や部位によって様々な形状である。濡れ現象は表面の化学組成と微細構造に大きく影響を受けるため、羽毛の微細構造の違いにより、霧吸着挙動が大きく異なる可能性がある。そのため、初めに鳥の種や部位の違いによる羽毛の微細構造の違いを調査した。実験には、ニワトリ、ガチョウ、カモ、ダチョウ、キジ、クジャク、ハクチョウの7種の鳥から得られる手羽、腹毛、腰毛、尾羽を用いた。

図1に市販の羽根の写真を示す。羽根は洗浄や脱色や染色が施されていない自然な状態である。陸生のニワトリ、ダチョウ、キジ、クジャクと水鳥であるガチョウ、カモ、ハクチョウの羽根を選定した。観察に用いた羽根の部位は、ニワトリの羽根は尾羽 黒、尾羽、腹毛、腰毛、ガチョウの羽根は手羽、腹毛、カモの羽根は手羽、腹毛、ダチョウの羽根は手羽、尾羽、キジの羽根は手羽、尾羽、クジャクの羽根は手羽、尾羽、ハクチョウの羽根は手羽である。

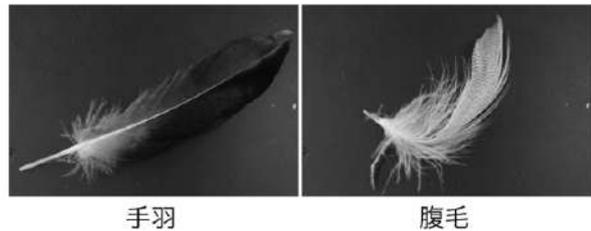
ニワトリ



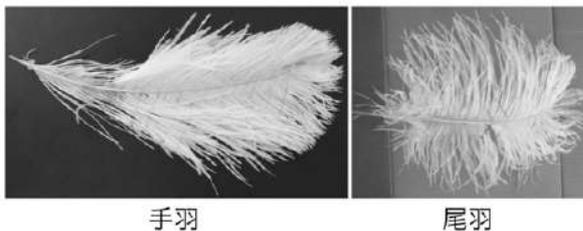
ガチョウ



カモ



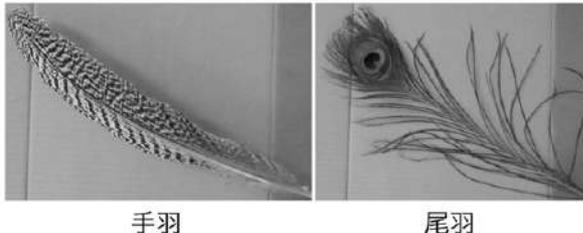
ダチョウ



キジ



クジャク

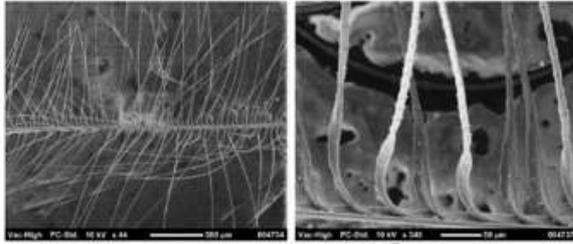


ハクチョウ

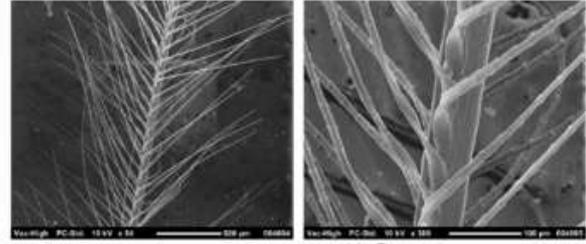


図1 本研究で用いた鳥の羽根の写真

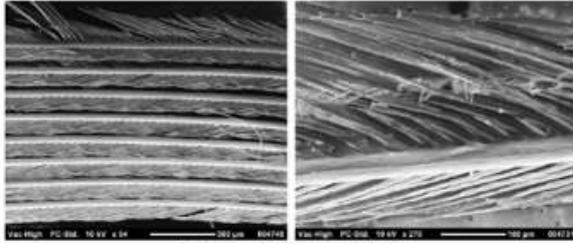
ニワトリ



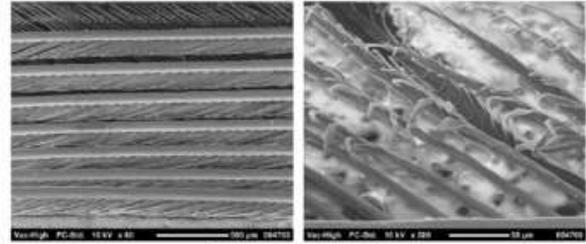
尾羽 黒 小羽枝①



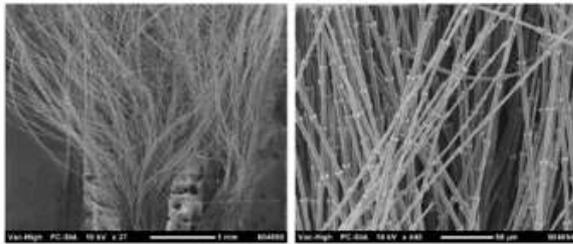
尾羽 小羽枝①



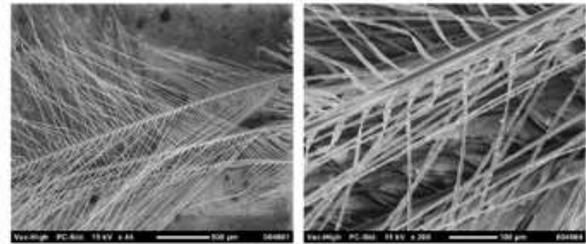
尾羽 黒 小羽枝②



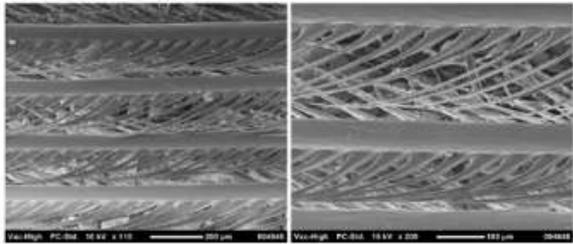
尾羽 小羽枝②



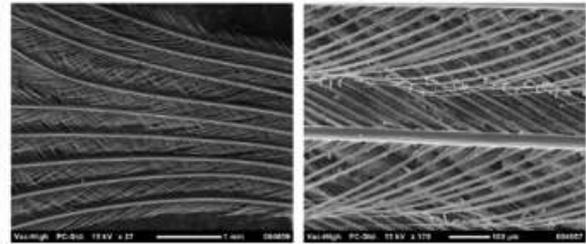
腹毛 小羽枝①



腰毛 小羽枝①

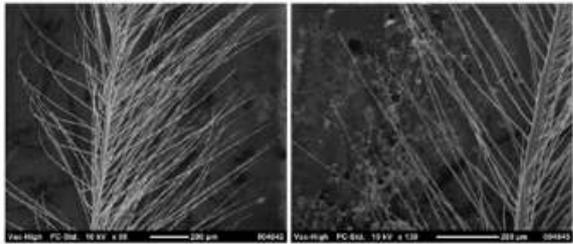


腹毛 小羽枝②

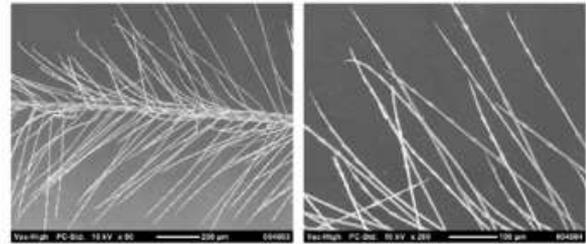


腰毛 小羽枝②

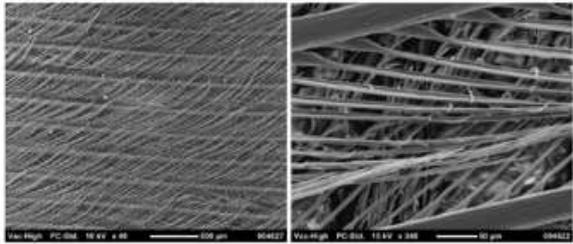
ガチョウ



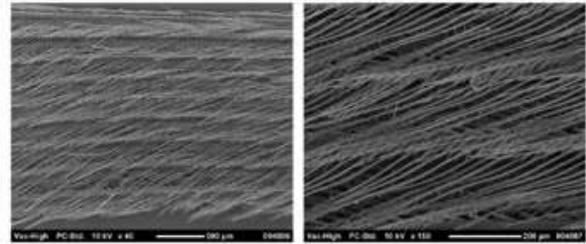
手羽 小羽枝①



腹毛 小羽枝①

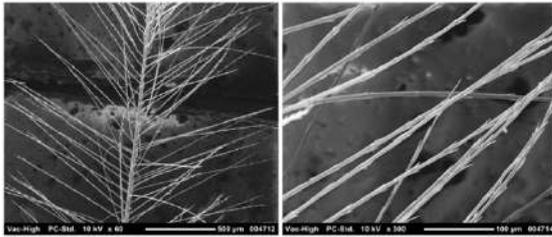


手羽 小羽枝②

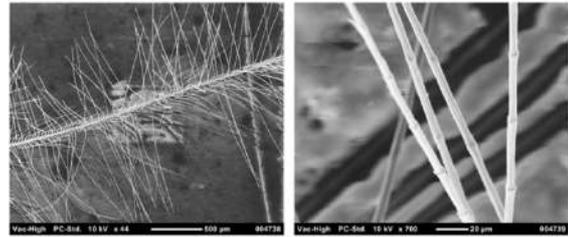


腹毛 小羽枝②

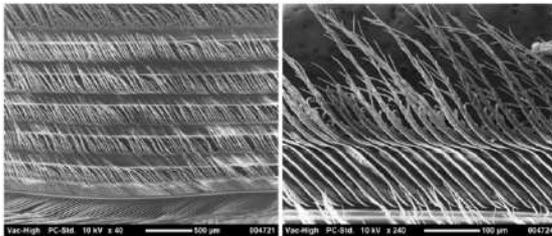
カモ



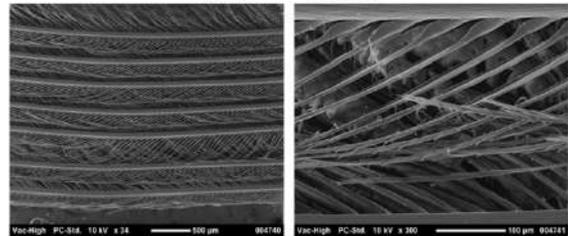
手羽 小羽枝①



腹毛 小羽枝①

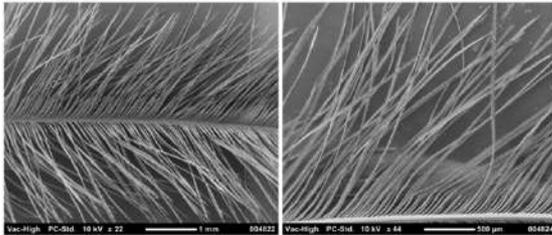


手羽 小羽枝②



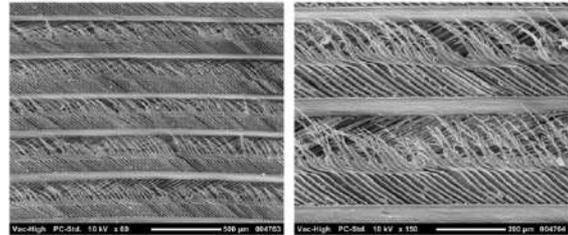
腹毛 小羽枝②

ダチョウ

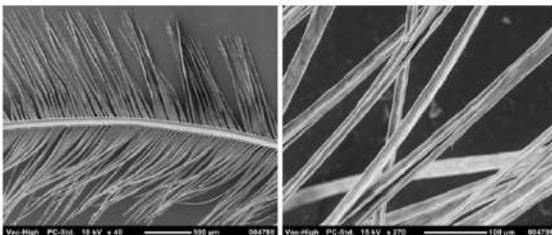


手羽 小羽枝①

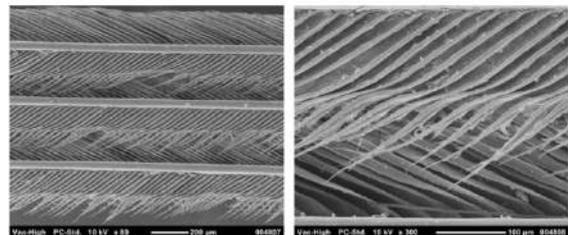
キジ



手羽 小羽枝②

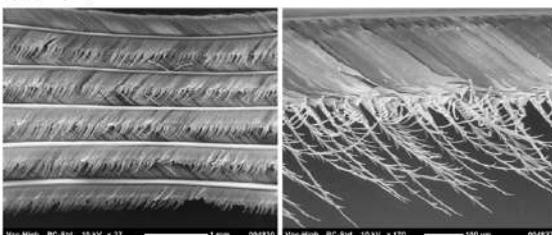


尾羽 小羽枝①



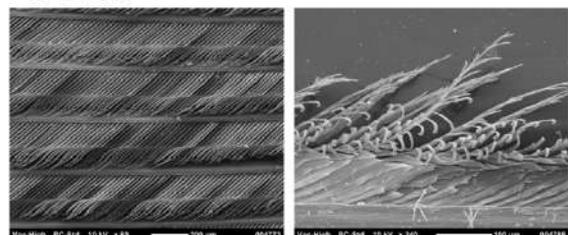
尾羽 小羽枝②

クジャク

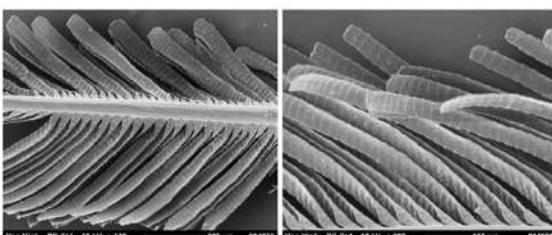


手羽 小羽枝②

ハクチョウ



手羽 小羽枝②



尾羽 小羽枝①

図 2 本研究で用いた鳥の羽根の SEM 画像

次に、各羽根の走査型電子顕微鏡画像を図2に示す。一般的に羽根は中央にある羽軸から左右に羽枝が生え、さらに羽枝から左右に小羽枝が生えている。小羽枝に鉤がある(有鉤小羽枝)と羽枝どうしが引っ掛かりあうことで密着し、図1のガチョウの手羽のように羽弁を形成する。反対に、小羽枝に鉤がない(弓状小羽枝)と羽枝は緩く絡み合うだけで、図1のニワトリの腹毛のように羽弁を形成しない。このように小羽枝の形状の違いによって、羽根の表面は大きくその性状を大きく変化させる。したがって、SEM観察では小羽枝の形状とそれに伴う羽枝の配列に注目して観察を行った。ガチョウの腹毛に顕著に見られるように、一枚の羽にも羽弁を形成していないと羽弁を形成している正羽のような部位がある。これらの部位は異なる微細構造を持つと予想されるため、綿羽のような部位の観察結果は小羽枝①、正羽のような部位の観察結果は小羽枝②として図2にまとめた。

小羽枝①は基本的に根本が平たく、そこが不規則に振れることにより特定方向に小羽枝が整列しづらい構造になっている。さらに鉤がない弓状小羽枝のため羽弁を形成できない。各々の羽の小羽枝①の特徴を観察すると、ダチョウとクジャク以外の鳥の小羽枝①は、先に行くにつれ円筒状になっており、節を持っている。ガチョウとカモの小羽枝①は節のある部分に棘状の構造がある。ダチョウの小羽枝①は、先端まで平たい。クジャクの尾羽の小羽枝①は飾り羽根であり、先端まで平たく幅広で、節がわかりやすい、例外的に小羽枝が根元で規則正しく振れており、小羽枝が整列して、羽弁を形成している。

小羽枝②も基本的に根本が平たいが、規則的に振れるため小羽枝が重なって整列しやすい構造になっている。さらに、有鉤小羽枝によって小羽枝が隣の羽枝の小羽枝に引っかかるため、羽枝どうしが密着し、一定間隔で並列している。羽枝の間隔は鳥の種や羽毛の部位によって異なるが、ダチョウの手羽以外の羽毛では150 μmから400 μmであることが明らかとなった。

4. 羽毛の濡れ性解析

様々な種の羽根の濡れ性を解析した結果、表と裏で静的接触角の異なったキジの手羽を詳細に解析した。キジの手羽は表側より裏側の方が約10度、接触角が低くなっている結果が得られた。これは、小羽枝の先に表側には鉤状の突起があるのに対し、裏側には直線状の突起が並ぶ。このことからこの鉤状の突起が直線状の突起と絡み、強固な小羽枝の配列を維持していることに起因していると考えられる。裏側から水滴を落とすと、直線状の突起により、表面積が増えることから接触角が低下したと考えられる。

次に自己組織化単分子膜法で表面修飾した羽根に対して、背中側からの接触角測定を行い、表面自由エネルギーの違いが羽根の撥水性に与える影響を検討した結果を図3aに示す。結果としては未修飾の羽根でも130°程度を示し、また、一番親水性に表面修飾した羽根でも114°程度と大きな接触角を示した。これにより、羽根自体の構造だけでも高い疎水的な構造であることがわかる。一番疎水的な表面修飾をしたものでは150°近くまで示したことから構造×表面修飾で相乗効果を生んでいることがわかった。

また、ペンギンから抜き取って間もない脂の付いた羽根に接触角測定を行ったところ、図3bに示すように接触角計のシリンジ先端の水滴が付着さえしなかったことから、この脂は使用したSAMよりも表面エネルギーが小さく、脂で表面修飾することで超撥水性を発現していることがわかった。

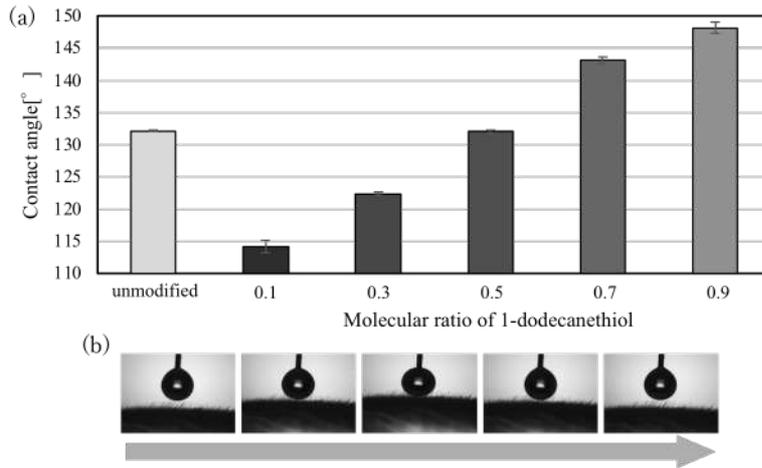


図3 (a) 自己組織化単分子膜により表面修飾をした羽根への静的接触角、
(b)尾脂腺付きの羽根に対する水滴挙動

5. エレクトロスピンニングによる羽毛模倣構造の作製

羽毛模倣構造はエレクトロスピンニングによりナノファイバー膜を作製することで行った。作製時の印加電圧を 10, 15, 20, 25, 30kV の 5 段階に分け、それ以外の条件は変化させずに紡糸することで、印加電圧による形状への影響を調査した。その繊維径分布と SEM 画像を図 4 に示す。

印加電圧を変化させても繊維径分布に大きな影響はなかったが、印加電圧が増加するとビーズが生じることがわかった。この要因としては、電圧が大きくなることで溶液がノズルを出てからコレクターに辿り着くまでの時間が短くなるため、溶媒が揮発しきらずにコレクターに繊維が付着するため、残存溶媒に凝集したと考えられる。

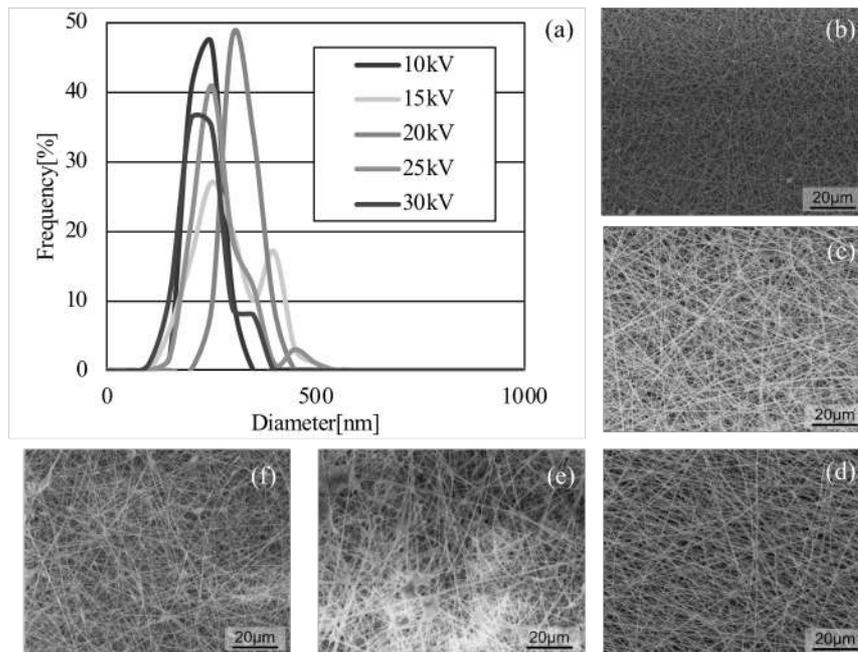


図4 印加電圧別の繊維径分布、各条件でエレクトロスピンニング法により作製した羽毛模倣構造 ; (b)10kV、(c)15kV、(d)20kV、(e)25kV、(f)30kV

6. 羽毛模倣構造の水分捕集能力の評価

接触角計(協和界面科学社 DM500)を用いて、作製した羽毛模倣構造の吸水性評価を行った。純水 5.0 μL をシリンジにより作製し、試料表面に着液させることで得られる接触角を測定する。その結果、図 5 に示すように羽毛模倣構造は優れた吸水性を有することがわかった。このような瞬時の吸収は霧捕集能力と密接な相関があると考えられる。



図 5 羽毛模倣構造の吸水性評価時の連続写真

7. まとめ

本研究では、羽毛を模倣した微細構造をエレクトロスピンニングにより作製し、霧捕集を目的とした吸水性評価を行った。その結果、エレクトロスピンニングにより作製したナノファイバー膜は、高い吸水性を有しており、優れた霧捕集能力が期待される。今後は、作製した羽毛模倣構造を用いた霧捕集の実地検証を試みる予定である。

謝辞

本研究を遂行する際の羽毛の提供にあたり、国立科学博物館、山階鳥類研究所、名古屋港水族館から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) Edward Bormashenko, Yelena Bormashenko, Tamir Stein, Gene Whyman, Ester Bormashenko, “Baxter wetting hypothesis and Cassie–Wenzel capillarity-induced wetting transition” *J. Colloid Interface Sci.*, 311 (2007) 212–216
- 2) M Panuccio, G Dell’Omo, G Bogliani, C Catoni, and N Sapir, “Migrating birds avoid flying through fog and low clouds” *Int. J. Biometeorol.*, 63 (2019) 231-239