

令和元年 11 月 27 日

報道機関 各位

東北大学大学院工学研究科

## 電気で潤うコンタクトレンズ

— バイオ電池搭載コンタクトレンズで電気浸透流による保湿効果を実証 —

### 【発表のポイント】

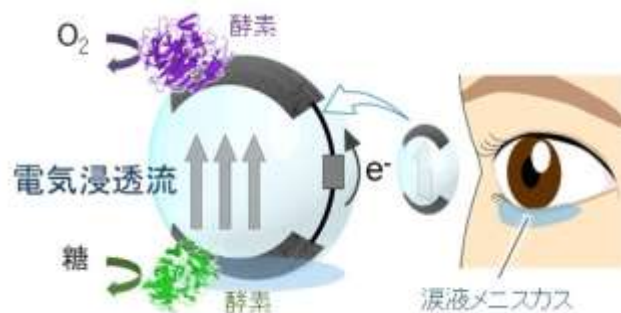
- ・ 電気浸透流の発生効率が高いハイドロゲル素材を開発
- ・ 通電によるソフトコンタクトレンズの乾燥速度の低下を確認
- ・ 生体親和性バイオ電池を搭載し保湿機能を実証

### 【概要】

東北大学大学院工学研究科の西澤松彦教授のグループは、電気浸透流の発生効率が高く成型性にも優れるハイドロゲル素材を開発し、それをコンタクトレンズに用いると、通電によってレンズ内に水流が発生し、乾燥速度が低下することを実証しました。さらに、生体親和性のバイオ電池を搭載して、外部からの給電を必要としない、有機物のみで構成された自己保湿型の抗ドライアイレンズの実現にも成功しました。

最近、センサや通信・表示素子を搭載したスマートコンタクトレンズの開発が盛んに行われており、眼圧や涙液中糖分などのモニタリングが検討され話題になっています。このようなスマートコンタクトレンズの普及には、ドライアイなどレンズの弊害への対応も必要です。涙液の不足によるドライアイは、違和感による QOL の低下、さらに角膜の炎症や損傷によって視覚障害の原因になる恐れがありますが、コンタクトレンズの装着は水分の蒸発を促進するため、ドライアイ症状を深刻化する傾向があります。レンズ材料自体の保水性を向上させる試みが永く行われてきたのに対し、今回の研究が目指したのは、電気的なレンズの保湿であり、煩雑な点眼に換わる、全く新しい水分補給方法の提案です。さらにバイオ電池による駆動は、オール有機の自己保湿型レンズの可能性を示しました。

本研究成果は、2019年11月28日に機能材料の有力誌「Advanced Materials Technologies」にオンライン版で公開されます。



自己保湿型コンタクトレンズ

## 【詳細な説明】

### (1) 研究背景

コンタクトレンズは、単なる視力矯正器具にとどまらず、美容・ファッションとしても普及しており、日本人の5人に1人が使用しています。そして今後、生体モニタや通信・表示機能を有するスマートレンズが登場すると、コンタクトレンズの役割がさらに拡大していくと予想されています。一方で、ソフトコンタクトレンズの装用は、図1で説明するように涙の蒸発を促進してしまうため、ドライアイの症状を誘発もしくは深刻化する傾向があります。ドライアイは、不快感によるQOLの低下だけでなく、眼球表面の炎症や損傷、視覚障害の原因となることもあるため、コンタクトレンズの保湿技術の開発が強く求められています。

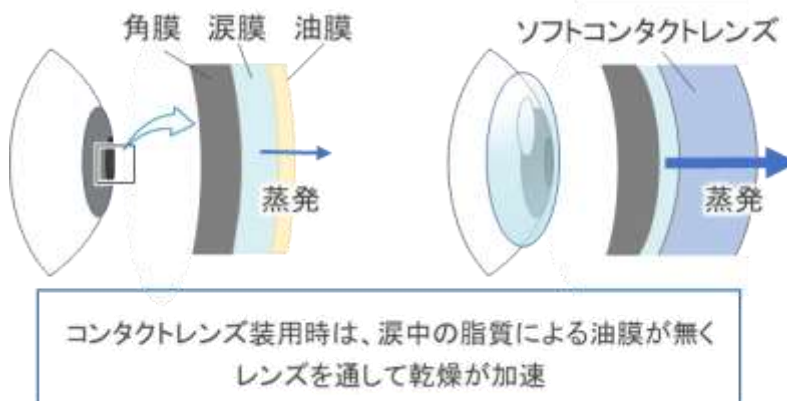


図1 コンタクトレンズによるドライアイ

このたび西澤グループは、コンタクトレンズ内に「電気浸透流」を発生させることで保湿が可能であることを実証しました。下瞼裏の涙液メニスカスから涙を汲み上げてレンズの湿潤を維持する新しいスマートレンズの開発につながる成果です。電気浸透流は、固定電荷の存在などによってイオンの移動度に大きな差がある場合に、通電に伴って生じる流れであり、キャピラリー電気泳動やマイクロ流路における送液に利用されています。一方、ハイドロゲルに固定電荷を導入して電気浸透流による送液システムとする検討例は殆どなく、コンタクトレンズ内部に発生する浸透流と保湿性能との関連が指摘されたこともありませんでした。今回、世界初の自己保湿コンタクトレンズの機能実証に成功したのは、ハイドロゲルの合成・成型技術、イオン伝導度による含水量モニタリング技術、および生体親和性電池による発電技術の蓄積によります。眼孔内の水分の流れ制御は、ドライアイの緩和だけでなく、目薬の徐放制御や、房水排出の誘起による眼圧制御においても重要であり、電気浸透流を利用する新技術が、点眼器や注射器に並ぶ眼孔への注出入法として発展すると期待できます。

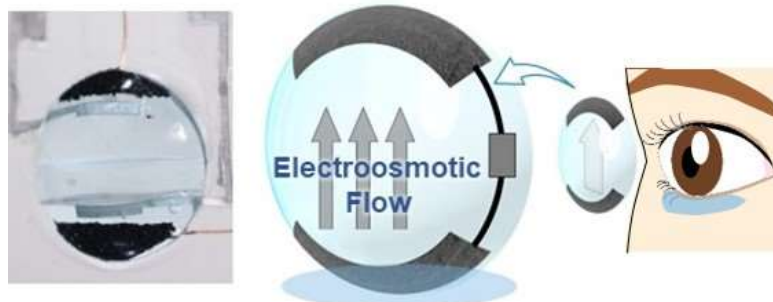


図2 新規の抗ドライアイ機構: 電気浸透流による保湿

## (2) 本研究の成果

メタクリル酸(MA)、2-ヒドロキシエチルメタクリレート(HEMA)、メチルメタクリレート(MMA) の3種類のモノマーを表1の割合で共重合し、固定電荷密度が異なるハイドロゲル(Sample 1~5)を調製しました。総てのモノマーが生体安全性を有し、既に市販のコンタクトレンズに使用されています。エチレングリコールジメタクリレート(EDMA)とV-65はそれぞれ架橋剤と重合開始剤です。MAのカルボキシル基は生体液のpH 7.4では酸解離して負電荷を有しており、その含量(2, 5, 7, 10, 15 wt%)によってハイドロゲル中の固定電荷量が調節できると考えました。ハイドロゲルなどの含水性イオン導体に通電する際、固定電荷の存在などによって正イオンと負イオンの移動度に大きな差が生じると、以下の式に従って電気浸透流  $U_{eo}$  ( $\mu\text{L} / \text{cm}^2 \cdot \text{min}$ )が発生します。

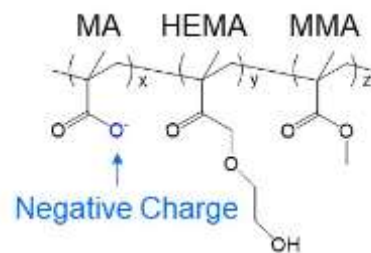
$$U_{eo} = k_{eo} E \quad (1)$$

$$k_{eo} = -\varepsilon \zeta / \eta \quad (2)$$

$k_{eo}$  ( $\mu\text{L} \cdot \text{mm} / \text{cm}^2 \cdot \text{min} \cdot \text{V}$ )は、印加した電場(V/mm)によって浸透流が発生する効率を意味する係数で、媒体(水)の誘電率  $\varepsilon$  (F/m)、固定電荷によるゼータ電位  $\zeta$  (mV)、および媒体(水)の粘度  $\eta$  (Pa·s) で決まるとされています。

表1 ハイドロゲルの組成

	MA	HEMA	MMA	EDMA	V-65
Sample 1	2	95	3	0.2	0.1
Sample 2	5	92	3	0.2	0.1
Sample 3	7	90	3	0.5	0.1
Sample 4	10	80	10	0.5	0.1
Sample 5	15	70	15	0.2	0.1



ハイドロゲルフィルム(Sample1~5)に発生する電気浸透流  $U_{eo}$  を計測し、MAの割合による電気浸透効率  $k_{eo}$  の変化を示した図3aは、MAが増えると $\zeta$ の値が大きくなり、その結果  $k_{eo}$  が大きくなることを明示しています。既存のコンタクトレンズ材料を組み合わせることによって電気浸透流が発生する材料が合成可能であり、MAの割合によって発生効率を調節できることが示されました。一方、図3bはMAの割合が増えるとハイドロゲルが脆くなることを示しています。厚さ0.2mmのコンタクトレンズ形状を十分に維持できるMA割合10wt%のハイドロゲル(Sample 4)を固定電荷が最大のハイドロゲル素材として以後の実験に用いました。

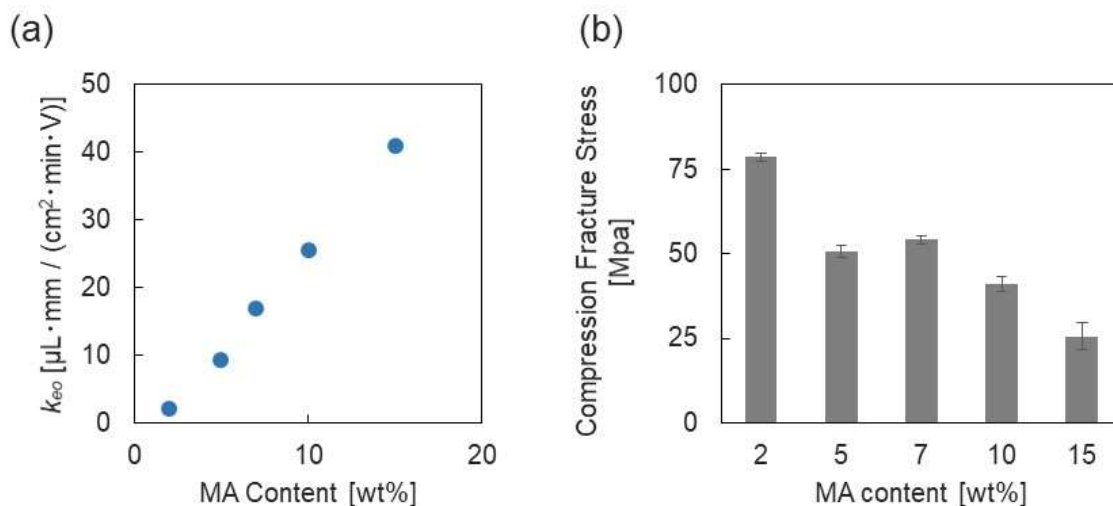


図 3 (a)MA の割合と電気浸透効率  $k_{eo}$  の関係、(b)MA の割合と圧縮破壊応力の関係

図 4a に示したセットアップで、電気浸透流によるハイドロゲルの乾燥防止の可能性を検討しました。ハイドロゲルシート ( $7.5 \times 14 \times 0.2 \text{ mm}^3$ ) の下端 3mm をマッキルペイン緩衝水溶液 (pH 7.0) に浸し、電気浸透流 (EOF) を発生させるための直流電流を流しながら、時々イオン電導度測定 (交流) に切り替えました。イオン伝導度はハイドロゲルの含水量と比例関係にあります。図 4b に代表的な結果を示します。初めの 30 分間は EOF を発生させない自然乾燥の場合であり、一定速度の伝導度の低下 (乾燥) が観察されました。そして、その後  $120 \mu\text{A}/\text{mm}^2$  を流して上向きの EOF を発生させた 30 分間では、イオン伝導度が初期の値に戻り、乾燥したハイドロゲルが再び湿潤したことが示されました。下向きの EOF は乾燥を速める効果を示しました。図 4c は乾燥速度 (プロットの傾き) が EOF 電流で変化することを示しています。自然乾燥の場合 (赤プロット) に比べると、比較的小さな電流密度 ( $20 \mu\text{A}/\text{mm}^2$ ) でも乾燥速度の低下が確認できました。 $50 \mu\text{A}/\text{mm}^2$  であれば殆ど乾燥しないことも分かり、この場合、EOF による給水と水の蒸発の速度が同等であると言えます。図 4d に EOF 電流値と乾燥速度の関係 ( $dG/dt$ ) を示しました。湿潤効果は EOF 電流が大きいほど顕著ですが、 $\sim 20 \mu\text{A}/\text{mm}^2$  程度の微小電流でも確認できました。この実験は、吊り下げたハイドロゲルシートで、比較的乾燥した環境 (湿度 40%) で行ったものであり、コンタクトレンズとして使用する状況では、さらに微小な電流でも保湿可能だと期待できます。

電気浸透流 (EOF) の保湿効果を、水分の直接観察によっても実証しました。球面状の眼球モデルをアクリル樹脂で作製し、これに MA10wt% のコンタクトレンズを装着した状態で、隙間に注入した水分の存在を蛍光ビーズの動きで評価しました。図 5 に結果を示します。図 5a は実験セットアップの写真と模式図です。図 5b の様に EOF 電流を流さない場合には 60min 後にビーズの動きが止まって、水分が消失したことが分かります。それに対して、 $53 \mu\text{A}/\text{mm}^2$  を印加すると、図 5c に示す様に 60min 後もビーズの移動度に変化が認められず、水分が保持されていることが確認できました。EOF がコンタクトレンズおよびコンタクトレンズ/眼球間隙の水分保持に効果を有し、ドライアイの緩和に有効である可能性を示しています。

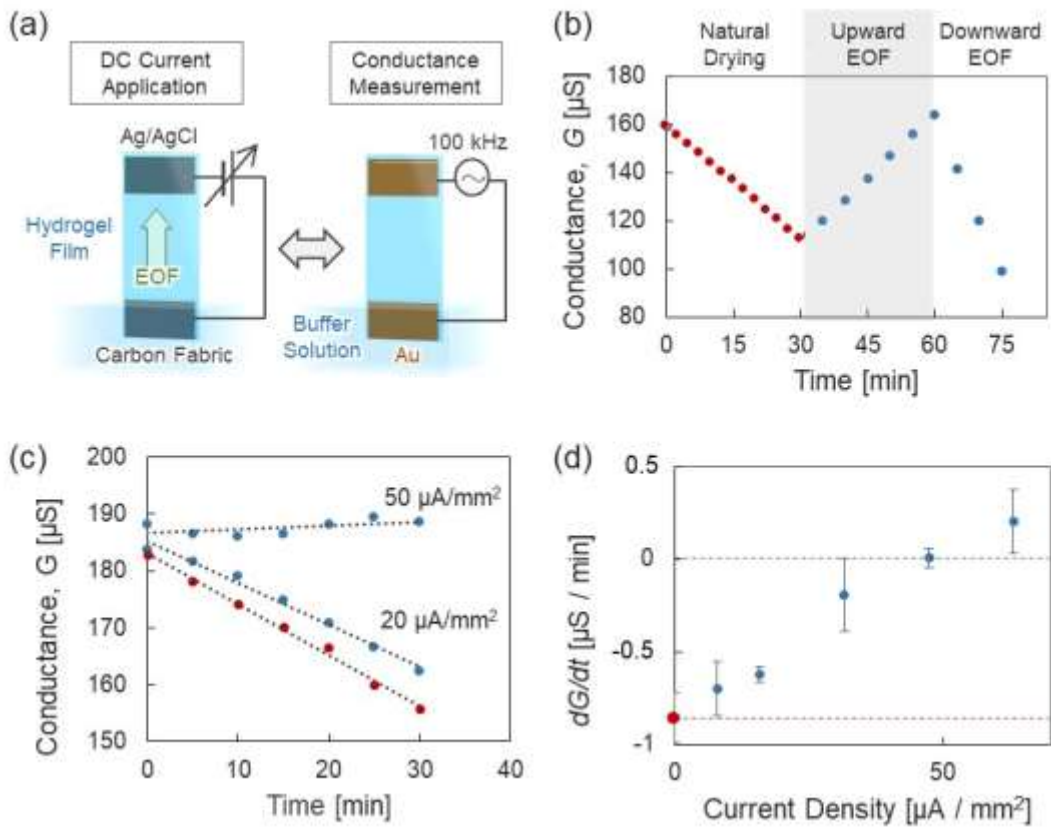


図4 電気浸透流(EOF)の湿潤効果:(a)EOF 電流の印加とイオン伝導度(含水量)の計測、(b)電流値を変化させた場合( $0 \rightarrow 120 \mu\text{A}/\text{mm}^2 \rightarrow -120 \mu\text{A}/\text{mm}^2$ )の伝導度変化、(c)EOF 電流値によるイオン伝導度変化(乾燥)、(d)EOF 電流による乾燥速度の変化

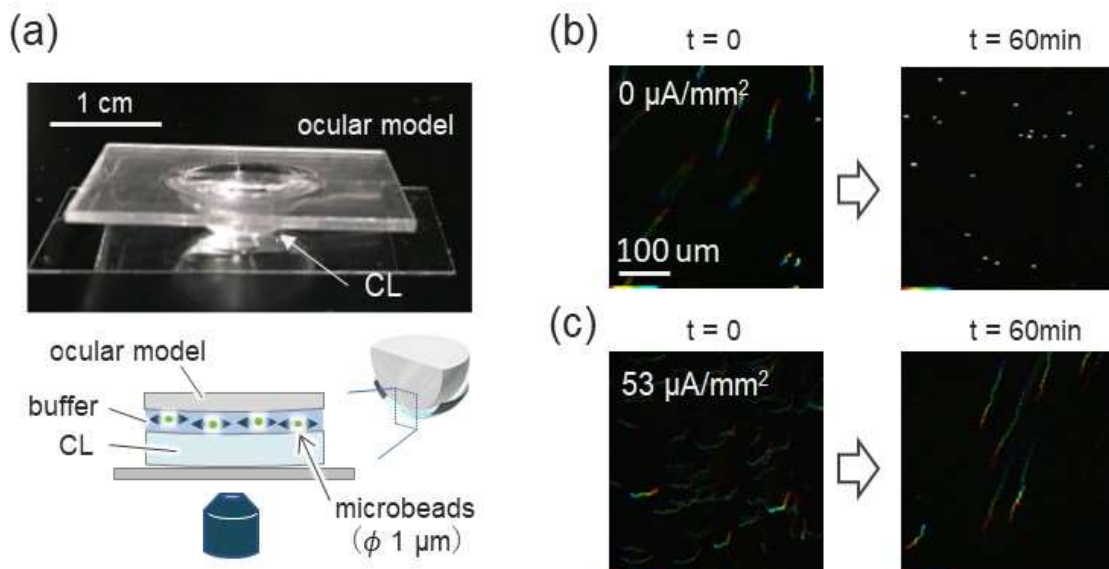


図5 EOFによる水分保持の直接観察:

(a)EOF 電流なしの自然乾燥, (b)  $53 \mu\text{A}/\text{mm}^2$  による水分保持

最後に、コンタクトレンズに電池を搭載して、外部からの電力供給を必要としない自立型デバイスとして駆動させる可能性を探りました。図 6a に示す 2 種類の生体適合性電池、Mg / O<sub>2</sub> 電池、および酵素触媒を用いるフルクトース / O<sub>2</sub> バイオ電池を検討しました。Mg は生体に安全な金属であり、体内分解デバイスなどにも用いられています。酵素触媒に用いたフルクトース脱水素酵素 (FDH) とビリルビンオキシダーゼ (BOD) は、メディエータ分子を必要としない直接電子移動型酵素であり、炭素繊維の布に吸着させて酵素電極にしました。図 6b に測定のセットアップを示します。ハイドロゲルシートで行った保湿効果の検証(図 4)と同様に、電池による直流電流の印加と、水分量モニタリングのための交流計測を切り換えながら継続して行いました。図 6c は、電池の出力電流の経時変化で、徐々に電流が低下してしまいました。電池自体の耐久性は、2 種類の電池共に 12 時間以上だと判っているのですが、ここで生じた電流低下はコンタクトレンズが徐々に乾燥することによって抵抗値が大きくなった為だと考えられます。しかしながら、図 6d に示す様に、自然乾燥の場合(オレンジ)に比べると、電池による発電によって明らかに乾燥速度が低下していることが示され、保湿効果が確認できました。この実験は、吊り下げたコンタクトレンズで、比較的乾燥した環境(湿度 40%)で行っているのですが、眼球に装着した状況では、さらに効率よく乾燥が防げると期待できます

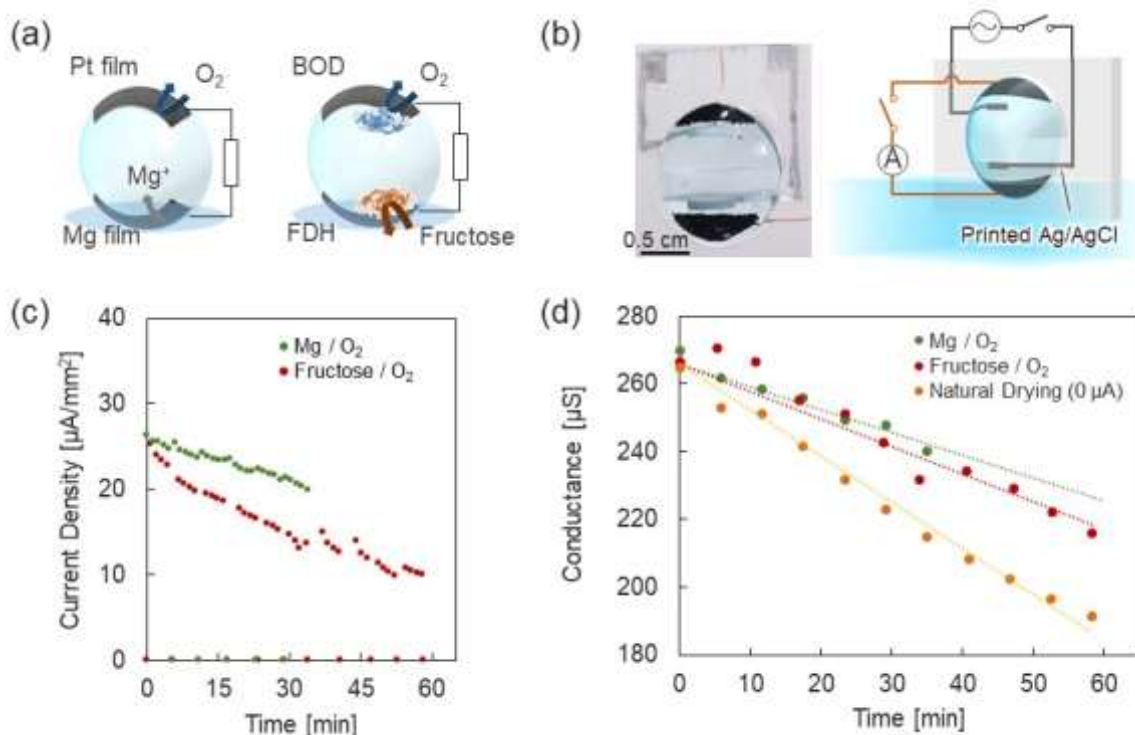


図 6 電池搭載による自己保湿機能の実証:

(a) Mg / O<sub>2</sub> 電池とフルクトース / O<sub>2</sub> バイオ電池、(b) 発電による EOF 電流の印加とイオン伝導度(含水量)の計測、(c)電池の出力電流の経時変化、(d)イオン伝導度(水分量)の経時変化

### (3) 展望

コンタクトレンズ内に電気浸透流を発生させることで保湿が可能であることを実証し、ドライアイの緩和が期待できることを示しました。スマートコンタクトレンズへの RF インダクタなどによる無線給電技術は目覚ましく発展しており、浸透流発生システムにも適用可能だと考えられます。さらに、本研究で行った電池の直接搭載は、外部からの給電を必要としない自己保湿レンズの開発であり、特にバイオ電池にはオール有機で生体・環境親和性に優れる特徴を生み出します。眼孔内の水分の流れ制御は、ドライアイ緩和だけでなく、目薬の徐放制御や、房水排出の誘起による眼圧制御においても重要であり、電気浸透流を利用する新技術が、点眼器や注射器に並ぶ眼孔への注出入法として発展していくことを期待します。

#### < 論文名・著者名 >

“Self-Moisturizing Smart Contact Lens Employing Electroosmosis” S. Kusama, K. Sato, S. Yoshida, M. Nishizawa, *Advanced Materials Technologies*, DOI: 10.1002/admt.201900889

#### 【問い合わせ先】

- 研究に関して  
東北大学大学院工学研究科 教授 西澤松彦  
TEL: 022-795-7003  
Email: nishizawa@biomems.mech.tohoku.ac.jp
  
- 報道に関して  
東北大学工学研究科情報広報室 担当 沼澤 みどり  
TEL: 022-795-5898  
Email: eng-pr@grp.tohoku.ac.jp