

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月21日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18169

研究課題名(和文)集積材料を用いたナノセルロースの伝熱特性推定

研究課題名(英文) Estimation of thermal conductive properties of nanocelluloses based on their accumulated materials

研究代表者

上谷 幸治郎 (Uetani, Kojiro)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：20733306

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、集積材料を用いたナノセルロース繊維の基礎特性評価を実施した。段階的に配向度を変えた試料を用いることにより、ナノセルロース繊維における熱伝導性の配向度依存性を実証し、繊維1本における伝熱異方性を推定した。さらに同様の方法から光学特性評価を実施することで、セルロース分子鎖の基礎光学特性である固有複屈折を導出した。これらは互いに配向度によって相関を示したことから、ナノセルロースの配向制御によって伝熱並びに光学異方性を同時制御する可能性が開拓された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で判明したナノセルロースの伝熱異方性により、熱流を制御するフォノンエンジニアリング材料が広く開発可能となる。特に、熱膨張係数や透明性との同時制御が可能な熱流制御紙は、高密度実装された電子デバイスからの排熱を効率化する基材への展開が期待される。また、セルロースの基礎光学特性である固有複屈折の導出により、ナノセルロースを本格的な光学部材へと展開する可能性が拓かれた。これにより従来配向度が正確に導出できなかったセロファンなどの非晶性セルロース材料において配向度の定量評価が可能になるため、セルロースのさらなる精密な活用が推進される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we carried out the analysis of fundamental parameters of nanocellulose fibers by using the accumulated paper materials. By using the aligned nanocellulose papers with the stepwise orientation degrees, we demonstrated the orientation dependence of thermal conductive properties to estimate the thermal conductive anisotropy for the single nanocellulose fibers. In addition, we carried on analyzing the optical parameters for these aligned nanocellulose papers to reveal the intrinsic birefringence for the cellulose molecule. Both the thermal conductivity and birefringence were linearly correlated with each other through the fiber orientation. The orientation control for these nanocellulose fibers pave the way for the simultaneously manipulation of the thermal conructive and optical performances.

研究分野：高分子材料物性

キーワード：セルロース 熱伝導性 配向制御 伝熱異方性 固有複屈折

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

セルロースは、最も身近な高分子素材として衣服や紙などとして広く活用され、現代においてもナノセルロース（NC）として再発明されることで高機能ナノ材料へと変換され、重要な要素素材であり続けている。NC は、木材細胞壁など生物組織をナノ解繊して得られる微細なナノファイバー類およびナノウィスカー類の総称であり、人工合成できない伸び切り鎖結晶を保持している。また、NC のサイズが可視光波長より有意に小さいことから、それらを成膜した紙材料ナノペーパーが高い透明性を示し、「透明な紙」として次世代のグリーンペーパーエレクトロニクスへの展開が期待されている。

ナノペーパーの基礎物性として、これまで高い力学特性やフレキシブル性、光学的透明性といった特性に着目されてきたが、最近、高い熱伝導特性が発現することが判明した。一般的に断熱材とみなされる高分子材料の中で、一部のナノペーパーがガラスの約3倍高い熱伝導性を示すことが見出され^[1]、さらに樹脂複合化によって「透明かつ伝熱する紙」にも変換できる^[2]。このため、高密度実装が予想されている次世代エレクトロニクスの排熱を効率化する基材としても応用が見込まれるようになった。それらのデバイス応用に先立ち、排熱基材の熱伝導性制御やさらなる応用方法開拓につなげるため、NC あるいはナノペーパーのどのような特徴・構造に起因して熱伝導特性を発現しているのかを明確にする必要に迫られていた。

一方、まったく逆のアプローチとして、NC を断熱材として用いる研究が広く展開されている。そもそもセルロースは、建物の断熱建材や断熱容器・スリーブあるいは衣服として身近な断熱材と認識されている。NC においても、その水懸濁液から NC 同士を強く凝集させずに乾燥させることで、低密度のエアロゲルあるいはキセロゲルが調製できる。その低密度集積体が、極めて高い断熱性（すなわち低い熱伝導性）を示すことが報告されている^[3]。断熱材の実用化に当たっても、NC や集積材料における熱伝導特性の把握が必要となっていた。すなわち、ナノファイバー1本あたりの伝熱性あるいはその異方性を把握すること、ならびにその集積体における伝熱特性の発現機構が学術的に重要な背景課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、セルロースの未知特性として重要な NC 繊維1本の熱伝導特性を、その高密度集積材料であるナノペーパーの特性から推定することを目的とした。同時に、ナノペーパーの構造と熱伝導特性の関係を精査し、高い伝熱性を発現する要素因子を特定することを目指した。そのとき、ナノペーパーの構造を形成するプロセスまで掘り下げて解析し、構造を作る過程から物性発現メカニズムへと考察を深めることとした。加えて、熱伝導特性と力学・光学特性など他物性との関連性を解明することを目指した。

3. 研究の方法

セルロース源として、最も純度の高い NC が調製可能な酢酸菌由来のナタデココ・ペリクルを原料とした。アルカリ煮沸により菌体残渣を除去し水洗精製したペリクルを短冊状に裁断し、力学試験機を用いて機械的に一軸延伸を行った。延伸量を段階的に変化させることで、NC の配向度が異なるナノペーパーを多数調製した。その後、ホットプレスにより熱圧乾燥させることで、内部構造の異なるナノペーパーを調製した。2次元検出器を用いた X 線回折測定により配向性評価を実施し、温度変調型示差走査熱量測定から比熱容量を導出した。配向度が異なるナノペーパーについて、スポット周期加熱放射測温法による熱伝導特性評価を行った。このとき、ナノペーパーの厚み方向（ND）、延伸配向方向（MD）、配向垂直方向（TD）の3方位を独立に評価することで、系統的な伝熱特性の解析を行った。力学特性の評価として線熱膨張係数を測定し、伝熱性との相関について評価した。

TEMPO 酸化ナノファイバーの水分散液を試料とし、独自に構築した複屈折経時測定システムを乾燥庫に設置して、ナノペーパーの成膜プロセスを解析した。複屈折の指標として2枚の偏光板の偏光軸を直前に配置させたクロスニコル下での白色度を用い、乾燥中の容器における鉛直方向ならびに水平方向の2方向をそれぞれ個別に解析した。また乾燥後のナノペーパーにおける構造評価として、原子間力顕微鏡による表面粗さ解析と光学的曇り度評価、熱重量分析による耐熱性評価を実施した。ナノペーパーに対する光学特性評価として位相差分布測定システムを用い、配向度が異なるナノペーパーにおける面内位相差を分布解析した。位相差を厚みで除して複屈折値を導出し、最大配向度における複屈折値をセルロース分子鎖の固有複屈折値として推定した。

4. 研究成果

ナタデココ・ペリクルを歪み量0~25%まで段階的に延伸した際、除荷してもさらなる収縮変形を生じず、一定の歪み量を保持した。すなわち、印加された延伸応力がほぼ完全に繊維配向変化による内部変形仕事に変換され、残留しなかったことが示唆された。これらを乾燥したナノペーパーでは延伸度と配向度が線形に相関し、面内配向度が段階的にコントロールされたことを確認した。一方、比熱容量は配向性によらずほぼ一定となった。熱伝導解析を行った結果、配向度が増加するに連れて MD では熱伝導率が上昇し、TD では減少する結果となった。ND ではほぼ一定の低い熱伝導率となった。延伸度25%の試験片において熱伝導率の方位差が最大となり、約220%の面内伝熱異方性を確認した。この結果は、NC が繊維長軸方向に有意に高い熱

伝導性を有していることを示すもので、伸び切り鎖による結晶構造の異方性を反映している。

この伝熱異方性をより明瞭に表現するため、延伸ペリクルを渦巻状に密着乾燥させたシート状材料を作製し、一端を熱板に挟んだ際の伝熱の様子を赤外線サーモグラフィにより観測した。その結果、NC が配向した方向において熱がより遠くまで伝搬し、配向と直交方向には伝搬性が悪いことが明瞭に示された。NC の配向性によって熱流の制御性が発現することが実証された。また、配向度に対する熱伝導率の変化が線形であったことから、配向度が最大となった理想的な状態における熱伝導率を外挿法により予測した。その結果、100%一軸配向した理想的なナノペーパーでは、MD および TD が ~ 3.4 および ~ 0.37 W/mK と算出された。TD の極限値が ND の 0.3 W/mK 程度に近づくという結果は、いずれも繊維断面方向への熱伝搬であることから妥当と考えられる。一方、MD と TD の約 10 倍の差異に関して、今回の伝熱性測定においては、面内/厚み方向に関わらず、レーザー入射により入力された熱は表面から裏面へと伝搬する。その過程で経る繊維界面の数は方位によらず同数であると考えれば、巨視的な熱伝導率の差異は NC 繊維 1 本の伝熱異方性に帰結することが予想された。すなわち、NC 繊維の結晶異方性が、長軸と短軸で約 10 倍の伝熱異方性を示すと予測される。この粗い予測結果は、分子動力学シミュレーションによる結晶の伝熱性解析の結果^[1]とよく一致した。NC 1 本の伝熱異方性に立脚することで、熱流制御材料が広く設計できることが判明した。

一方、このような「伝熱する紙」の応用に際して、他物性との関係性も重要となる。例えば、電子デバイスの排熱基材として活用する場合、熱寸法安定性や透明性を併せ持つ複合性能が要求される。本研究の材料は、線熱膨張係数と熱拡散率が反比例の関係を示した。すなわち、熱寸法安定性と伝熱性に強く関連しているため、両者の同時制御が可能であることを示している。さらに、既報^[2]にしたがって樹脂複合による透明化を試みた所、延伸量 25%の配向ナノペーパーにおいて 40%以上透過率を向上しながら、MD と TD で 2.5 ならびに 0.5 W/mK と約 500%の伝熱異方性を示す透明・伝熱紙となった。集積材料としての長所を発揮させることで、さらなる高機能化が期待される。

次に、NC 水分散体の乾燥挙動を複屈折を用いて詳細に解析した所、NC は段階的な配列シーケンスを経ることで最終的なナノペーパーに乾燥することが判明した。まず、乾燥表面である液面で NC 繊維が濃縮を起こし、液面付近に濃縮層が発生する。このとき、層内部では NC がランダムに分散している。その後、乾燥が進むと液面が下がると同時にさらに濃縮が進み、層内部で NC 繊維がネマチック配列を始める。層圧の増加とともに層内部の配列が進み、最終的にキラル・ネマチック性を有するナノペーパーに乾燥することがわかった。NC 水分散体の初期濃度が異なっても、濃縮層が発現する見かけ濃度はほぼ同じであった。乾燥したナノペーパーは、厚みが増すにつれ光学位相差も増大しており、配向の程度が変化していることを支持している。

このような光学制御性を配向によっても発現したことから、NC あるいはセルロース分子鎖の基礎光学特性である固有複屈折が極めて重要となっている。しかし、既報におけるセルロースの固有複屈折値は測定試料や方法によって大きく異なっており、光学制御性を応用するためのボトルネックとなっていることが判明した。そこで、本研究では 3 つの解決策を持ってより信頼性の高い固有複屈折値の導出について検討した。まず、直線状態の高分子鎖における複屈折の最大差である固有複屈折を求めるためには、伸び切り鎖結晶を有する NC が最も好ましい試料と考えられた。次に、試料の配向度を段階的に変化させて測定される複屈折値を用いて最大配向時の複屈折値を固有値として外挿する基本的手法が一般的に適用されるが、複屈折の二色性と 2 次元検出器付き X 線回折測定から求まる分子配向度が一致する領域 (X 線による配向度で 0.5 以下) の試料を用いることにした。最後に、複屈折値の測定を精密化するため、多点測定による分布解析が可能となる方法を適用した。

これらの解決策を適用することで、配向ナノペーパーの平均複屈折値が X 線配向度に対して良い線形相関を示した。この近似直線を外挿することで、セルロース分子鎖の固有複屈折値を 0.09 であると導出した。この値は、従来予想されていたセルロースの値より大きく、また汎用ポリマーと比較しても高い部類に属することが判明した。すなわち、セルロースは元来、光学制御性が高く、弱い配向性でも高い光学位相差を発する性能があることが分かった。これは、液晶ディスプレイなどオプトエレクトロニクスにおける光学補償部材としての性能が高いことを意味する。さらに、ナノペーパーの複屈折値を面内方向熱伝導率と対比したところ、良い直線性があることが判明した。すなわち、伝熱異方性と光学異方性を同時に併せ持ち、制御可能であることが初めて明らかになった。この複合性能は、従来のプラスチックフィルムでは発現しない新規性能であり、セルロースを本格的な光学部材として高度利用する契機となる結果が得られたと言える。学術的にも、セルロース分子鎖の固有複屈折値が判明したことにより、これまで配向度が正確に評価できなかった非晶性セルロースフィルム (セロファンやレーヨンなど) の分子配向度が、複屈折を用いて精密に定量できるようになった。固有複屈折という基礎光学特性を解明することにより、セルロースのより精密な工学利用が可能になると考えている。

引用文献

- [1] K. Uetani, T. Okada, H. T. Oyama, *Biomacromolecules* **2015**, *16*, 2220.
- [2] K. Uetani, T. Okada, H. T. Oyama, *J. Mater. Chem. C* **2016**, *4*, 9697.

- [3] Y. Kobayashi, T. Saito, A. Isogai, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2014**, 53, 10394; K. Sakai, Y. Kobayashi, T. Saito, A. Isogai, *Sci. Rep.* **2016**, 6, 20434.
- [4] J. A. Diaz, Z. Ye, X. Wu, A. L. Moore, R. J. Moon, A. Martini, D. J. Boday, J. P. Youngblood, *Biomacromolecules* **2014**, 15, 4096.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 5 件)

1. Kojiro Uetani, Hiroataka Koga, Masaya Nogi Estimation of the Intrinsic Birefringence of Cellulose Using Bacterial Cellulose Nanofiber Films, *ACS Macro Letters*, 査読有り, **2019**, 8, 250-254. (DOI: 10.1021/acsmacrolett.9b00024) (表紙に採択)
2. Kojiro Uetani, Shogo Izakura, Takaaki Kasuga, Hiroataka Koga, Masaya Nogi, Self-Alignment Sequence of Colloidal Cellulose Nanofibers Induced by Evaporation from Aqueous Suspensions, *Colloids and Interfaces*, 査読有り, **2018**, 2(4), 71. (DOI: 10.3390/colloids2040071)
3. Juanjuan Fan, Shinsuke Ifuku, Mengzhu Wang, Kojiro Uetani, Haiwei Liang, Haipeng Yu, Yongming Song, Xiaohe Li, Jiale Qi, Yiqun Zheng, Haigang Wang, Jing Shen, Xianquan Zhang, Qing Li, Shouxin Liu, Yixing Liu, Qingwen Wang, Jian Li, Ping Lu, Zhuangjun Fan, Wenshuai Chen, Robust Nanofibrillated Cellulose Hydro/Aerogels from Benign Solution/Solvent Exchange Treatment, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 査読有り, **2018**, 6(5), 6624-6635. (DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b00418)
4. Kojiro Uetani, Kimihito Hatori, Thermal conductivity analysis and applications of nanocellulose materials, *Science and Technology of Advanced Materials*, 査読有り, **2017**, 18(1), 877-892. (DOI: 10.1080/14686996.2017.1390692)
5. Kojiro Uetani, Takumi Okada, Hideko T. Oyama In-plane Anisotropic Thermally Conductive Nanopapers by Drawing Bacterial Cellulose Hydrogels, *ACS Macro Letters*, 査読有り, **2017**, 6(4), 345-349. (DOI: 10.1021/acsmacrolett.7b00087)

〔学会発表〕 (計 33 件)

1. 上谷幸治郎、宇都卓也、安藤大将、鈴木望、捻れたセルロースナノ繊維の数理モデルが示す力学的特徴、第 69 回日本木材学会大会、2019 年
2. 上谷幸治郎、古賀大尚、能木雅也、ナノファイバーを用いたセルロースの基礎光学特性の解明、第 69 回日本木材学会大会、2019 年
3. 上谷幸治郎、井櫻勝悟、古賀大尚、能木雅也、セルロースナノペーパーにおける熱拡散性の応力応答、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、2019 年
4. Uetani, K., Izakura, S., Kasuga, T., Koga, H., Nogi, M., Drying Mechanism of Cellulose Nanopapers under Evaporation-Condensation Process, The 22nd SANKEN International Symposium, The 17th SANKEN Nanotechnology International Symposium, 2019 年
5. 上谷幸治郎、伝熱する紙の開発とその特性 (招待講演)、第 57 回機能紙研究会、2018 年
6. 上谷幸治郎、北野基弥、大山秀子、羽鳥仁人、田子敬勉、古賀大尚、能木雅也、応力によるセルロースナノペーパーの熱拡散率スイッチング性、第 39 回熱物性シンポジウム、2018 年
7. 上谷幸治郎、古賀大尚、能木雅也、セルロースナノペーパーの階層構造と光学特性 (依頼講演)、第 67 回高分子討論会、2018 年
8. 上谷幸治郎、古賀大尚、能木雅也、北野基弥、大山秀子、田子敬勉、羽鳥仁人、セルロースナノペーパーの熱拡散性における応力スイッチング、セルロース学会第 25 回年次大会、2018 年
9. 上谷幸治郎、北野基弥、大山秀子、田子敬勉、羽鳥仁人、ナノセルロース不織ペーパーにおける動的な熱拡散性、第 85 回紙パルプ研究発表会、2018 年
10. 上谷幸治郎、北野基弥、大山秀子、セルロースナノファイバーの複屈折の推定、平成 30 年度繊維学会年次大会、2018 年
11. 上谷幸治郎、ナノファイバーフィルムに見出された伝熱特性と応用可能性、日本化学会第 98 回春季年会 2018、アドバンスト・テクノロジー・プログラム (ATP) T1 (社会を支える基盤技術) B (若手が切り拓くセルロースナノファイバーの新しい可能性) 依頼講演 3A2-29、2018 年
12. 上谷幸治郎・北野基弥・大山秀子・田子敬勉・羽鳥仁人、セルロースナノペーパーの伝熱における応力依存性、第 68 回日本木材学会大会、2018 年
13. 上谷幸治郎・岡田拓巳・大山秀子、ナノセルロースの配向集積に基づく熱制御性の発現、第 13 回バイオマス科学会議、2018 年
14. 上谷幸治郎・岡田拓巳・大山秀子、ナタデココを用いた熱流制御ナノペーパー、第 38 回熱物性シンポジウム、2017 年
15. Uetani, K., Okada, T., Oyama, H. T., Thermally Conductive Cellulose Nanopapers, The 4th International Cellulose Conference ICC2017, 2017 年
16. 上谷幸治郎・岡田拓巳・大山秀子、高結晶性ナノセルロース集積体における伝熱機構と熱輸送制御性 (依頼講演)、第 66 回高分子討論会、2017 年

17. 上谷幸治郎・岡田拓巳・大山秀子、天然セルロースの伝熱における結晶子サイズ効果と熱流制御材料、第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、2017 年
18. 上谷幸治郎・岡田拓巳・大山秀子、ナノセルロース集積体の伝熱異方性と熱流制御材料、第 24 回セルロース学会年次大会、2017 年
19. 上谷幸治郎・岡田拓巳・大山秀子、セルロースナノペーパーにおける構造依存的伝熱特性(若手優秀発表賞口頭発表部門受賞)、第 84 回紙パルプ研究発表会、2017 年
20. 上谷幸治郎・岡田拓巳・大山秀子、面内異方性を持つ伝熱セルロースナノペーパー(若手優秀発表賞受賞)、平成 29 年度繊維学会年次大会、2017 年

〔図書〕(計 6 件)

1. 伝熱工学の基礎と熱物性測定・熱対策事例集、第 2 章第 2 節第 5 項 スポット周期加熱放射測温法によるセルロースナノペーパーの熱拡散率測定(上谷幸治郎 pp. 149-154(分担執筆)、(株)R&D 支援センター、2019 年 (ISBN:978-4-905507-31-4)
2. 上谷幸治郎、【コラム】熱を伝える紙を開発！(上谷 幸治郎氏・大阪大)、科学技術.com、Article no. 694、2019 年、<https://st-db.com/archives/694>
3. 上谷幸治郎、大山秀子、セルロースナノファイバーを用いた異方伝熱材料の開発、*Nanofiber* **2018**, 9(1), 22-25. (表紙に採択)
4. 上谷幸治郎、フレキシブル・エレクトロニクスに向けた透明伝熱セルロースナノペーパーの開発、*Material Stage* **2018**, 18(2), 43-45.
5. 上谷幸治郎、セルロースナノペーパーの構造と伝熱、*Cellulose Communications* **2018**, 25(2), 46-50.
6. 上谷幸治郎、セルロースナノファイバーによる伝熱材料、*工業材料* **2017**, 65, 80-81.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：ふすま含有熱可塑性樹脂組成物及びその製造方法
 発明者：池本裕之、牧田美希、野出純一、川口亮太、上谷幸治郎
 権利者：学校法人立教学院、日清ファルマ株式会社
 種類：特許
 番号：特願 2018-064319
 出願年：2018 年
 国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年：
 国内外の別：

〔その他〕

○アウトリーチ活動情報

1. 上谷幸治郎、エレクトロニクスの効率的排熱に向けた 透明伝熱セルロースナノペーパーの開発「フレキシブルデバイス・ディスプレイの材料や部材のフレキシブル化対応、今後の展望」技術情報協会セミナーNo.903205、2019 年
2. 上谷幸治郎、セルロースで熱を操る！、2019NEW 環境展、2019 年
3. 上谷幸治郎、セルロースで熱を操る！、nano tech 2019、2019 年
4. 上谷幸治郎、生体組織由来のナノファイバー材料における熱輸送特性、第 1 回医学系研究科-産業科学研究所懇話会、2019 年
5. 上谷幸治郎、熱を伝える紙を開発！、大阪大学産業科学研究所第 66 回定例記者会見 https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2018/20181219_2、2018 年
6. 上谷幸治郎、セルロースで熱を操る！、Semicon Japan 2018、2018 年
7. 上谷幸治郎、井櫻勝悟、外部応力による熱拡散率スイッチング性の実測、第 74 回産研学術講演会、2018 年
8. 上谷幸治郎、セルロースで熱を操る！、イノベーション・ジャパン 2018、2018 年
9. Uetani, K., Electronics on Cellulose, Research meeting between ISIR and TU/e, ISIR, Osaka, 2018 年
10. 上谷幸治郎、ナノファイバーフィルムに見出された伝熱特性と応用可能性、日本化学会第 98 回春季年会 2018、アドバンスト・テクノロジー・プログラム (ATP) T1 (社会を支える

基盤技術) B (若手が切り拓くセルロースナノファイバーの新しい可能性) 依頼講演、2018年

11. 上谷幸治郎、セルロースの伝熱特性を測る！熱伝導性バイオナノファイバーの発見と特性評価、株式会社ベテル “熱伝導測定のコホンを学ぶ計測技術セミナー”、2018年
12. 上谷幸治郎、熱を伝えるセルロースナノファイバー、nano tech 2018、国立研究開発法人科学技術振興機構 先進的低炭素化技術開発 (ALCA) シンポジウム“セルロースナノファイバー・高分子多糖類；バイオマテリアルの新展開”、2018年
13. Uetani, K. Heat guiding materials developed by anisotropic thermally conductive nata de coco nanopapers, International Symposium on Smart Molecules and Materials, 2017年
14. 上谷幸治郎、セルロースナノファイバーの新規伝熱特性と応用可能性、CMC リサーチセミナー“セルロースナノファイバー複合系高分子材料の最新動向と実用例”、2017年

○報道関連情報

1. Nanopapers could pave the way for development of paper-thin electronics. Asian Research News, http://www.researchsea.com/html/article.php/aid/12413/cid/2/research/technology/national_institute_for_materials_science/plants_cool_future_electronics_asia_research_news_2019_magazine_.html、2019年
2. 阪大、熱を伝える紙を開発——セルロースナノファイバーを高密度のシート材料へ成形し高い熱伝導性を発揮、fabcross for エンジニア、https://engineer.fabcross.jp/archieve/181221_osaka-u.html、2018年
3. 【CNF】大阪大学産業科学研究所、熱を伝える紙を開発。高密度シート材料に成形し高い熱伝導性を発揮、加工技術研究会、<http://www.ctiweb.co.jp/jp/news/2779-cnf-10.html>、2018年
4. 大阪大、熱を伝える紙を開発、科学技術.com、<https://st-db.com/archives/587>、2018年
5. 阪大、熱を伝える紙を開発—セルロースナノファイバーを高密度のシート材料へ成形し高熱伝導性を発揮、日本経済新聞 Online、2018年

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。