

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04243

研究課題名(和文) 脳波計を用いたナノシートの摩擦・摩耗特性と触覚記憶の関係解明

研究課題名(英文) Relationship between friction and wear characteristics of nanosheets and tactile memory using electroencephalograph

研究代表者

砂見 雄太 (SUNAMI, YUTA)

東海大学・工学部・准教授

研究者番号：10709702

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、従来スピコート法で作製されていたナノシートをロール・ツー・ロール技術といった生産性を劇的に向上させる方法で大量生産する。また、適正な制作条件を探索し、ナノシートの厚みをコントロールする。得られたナノシートは膜厚さを測定し、その後シリコン基板に貼り付けたナノシートと指の間の摩擦係数を、垂直荷重と摩擦力を同時に測定できるロードセルを用いて測定し、それらの値から摩擦係数を算出する。その際、ナノシートの摩耗状態もFE-SEMなどを用いて表面を観察する。次に、PDMSを用いて鮫肌の型を作製し、その表面にナノシートを貼付して細菌の接着性について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、ナノシートの大量生産方法とそのトライボロジー特性について実験的に検討した。本研究では将来の医療分野を視野に入れて指とナノシート間の摩擦係数を測定し、膜厚さが薄くなるほど摩擦力が大きくなることを確認した。また、その際の摩耗状態についても定性的に観察した。さらに、ナノシートの接着力についても実験的に検討し、膜厚さ依存性があることがわかった。次に、鮫肌の型にナノシートを貼付することで細菌の接着力が低下することを確認した。

これらの成果は、ナノシートの基礎特性を明らかにしたことに学術的な意義があり、かつナノシートを大量生産できる製作条件を見出したことは社会的意義があると確信している。

研究成果の概要(英文)：In this study, nanosheets, which were previously produced by spin coating, are mass-produced using roll-to-roll technology, a method that dramatically improves productivity. In addition, optimal production conditions are explored to control the thickness of the nanosheets. The film thickness of the resulting nanosheets is measured, and then the friction coefficient between the nanosheet attached to a silicon substrate and a finger is measured using a load cell that can simultaneously measure normal load and friction force, and the friction coefficient is calculated from these values. At that time, the wear state of the nanosheet is also observed on the surface using FE-SEM, etc.

Next, a shark skin mold was made using PDMS, and the nanosheet was attached to its surface to examine the adhesiveness of bacteria.

研究分野：トライボロジー

キーワード：ナノシート トライボロジー 摩擦係数 バイオミメティクス 接着力 摩耗

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は、脳波計を用いてナノシートの有する摩擦・摩耗特性と触覚の関係を明らかにすることを主たる目的とした。また、ナノインプリント法を用いてナノシートに超微細構造を付与し、そのナノシートのトライボロジー特性を実験的に解明する。微細構造パターンとそれを付与したことにより発現するトライボロジー特性については、ナノシートの有する高い凝着力のメカニズム解明および摩擦係数について実験的に検討する。最終的には、摩擦実験中に人間の脳波を脳波測定器を用いて測定し、脳波と摩擦係数の相関関係を明らかにする。これらは国内外でもまったく行われておらず、極めて高い新規性と独創性を有する。これらの知見を得ることにより、将来の皮膚および触覚関連分野の新たなテーマとなる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、従来スピコート法で作製されていたナノシートをロール・ツー・ロール技術といった生産性を劇的に向上させる方法で大量生産する。また、適正な制作条件を探索し、ナノシートの厚みをコントロールする。得られたナノシートは膜厚さを測定し、その後シリコン基板に貼り付けたナノシートと指の間の摩擦係数を、垂直荷重と摩擦力を同時に測定できるロードセルを用いて測定し、それらの値から摩擦係数を算出する。その際、ナノシートの摩耗状態も FE-SEM などを用いて表面を観察する。さらに、摩擦係数の他にナノシート特異的に発現する高接着性については、凝着力を原子間力顕微鏡にて測定する。

次に、PDMS を用いて鮫肌の型を作製し、その表面にナノシートを貼付して細菌の接着性について検討した。

3. 研究の方法

図 1 にナノシートを作製するために使用した薄膜コーティング装置を示す。図 2 にナノシートを製造する際に適用した方法の手順を示す。この方法は犠牲膜法と呼ばれ、層（シリコン基板とナノシート）の間に形成される中間層を除去することでナノシートを剥離できるプロセスである。マイクログラビア印刷法を用いた薄膜コーティング装置で溶液濃度と周速比を変えることで膜厚を調整した。周速比はマイクログラビアロールの回転速度をフィルムの搬送速度で割ることで求められる。なお、コーティングでは固体ポリマーを液化させて溶液タンクに入れる必要がある。次に使用するポリマーとその溶媒について説明する。まず、中間層にはポリビニルアルコール (PVA) を使用した。PVA は水溶性であるため、溶媒には超純水を使用した。このとき超純水に溶解した PVA 溶液の濃度は 20mg/ml である。ナノシートの材料として PDLLA を用い、

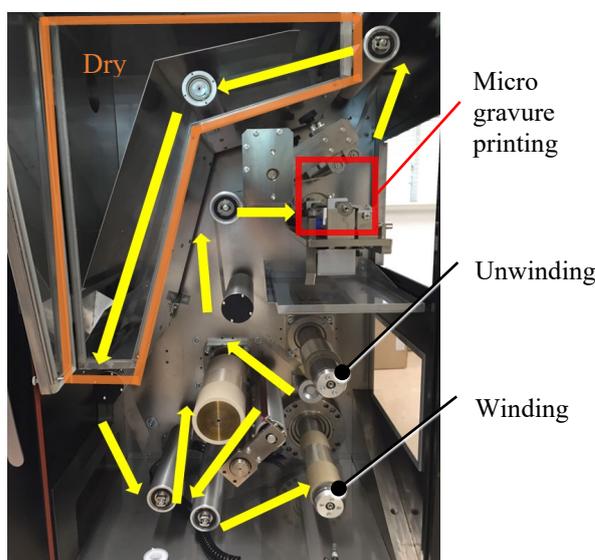


Figure 1 Internal structure of roll-to-roll; This device can continuously unwind, coat, dry, and wind.

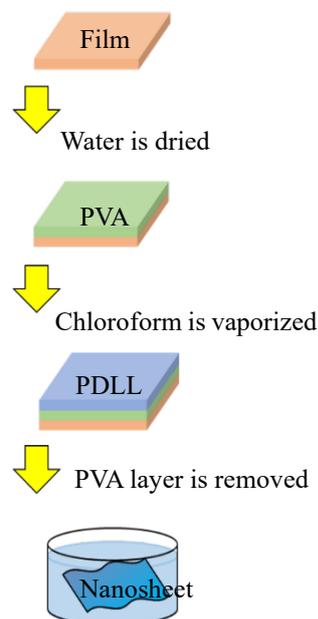


Figure 2 Sacrificial film method

Table 1 Experimental conditions

		PVA	PDLLA
Solvent		Ultrapure water	Chloroform
Solution concentration	S [mg/ml]	10	10, 20
Conveying speed	V_f [mpm]	1.0	4.0
Rotation speed of MG roll	V_g [rpm]	64	64
Circumferential speed ratio		1.0	0.3, 0.6, 1.0, 1.2

溶媒としてクロロホルムを用いた。クロロホルムに溶解した PDLLA の濃度は 10, 20mg/ml である。ロール状に巻かれたフィルム基板を薄膜コーティング機にセットし、巻き戻す。まず、PVA を超純水に溶解した溶液を塗布、乾燥させ、次に PDLLA をクロロホルムに溶解した溶液を塗布し、乾燥させた。

表 1 に製造条件を示す。作製した 3 層フィルム（フィルム基板、PVA、PDLLA）を超純水に浸漬することで、中間層の PVA を溶解し、PDLLA ナノシートをフィルム基板から剥離した。

ナノシートの厚みの測定には表面形状測定器（Dektak、BRUKER）を使用した。測定時には、機械幅方向（CD）にピンセットで溝を入れ、その凸凹の差をフィルムの厚みとした。

ナノシートと皮膚間の摩擦力の測定には、図 3 の 3 軸力計（ATI F/T Sensor Gamma、ATI Industrial Automation）を使用した。20 mm×20 mm のナノシートを載せたシリコン基板を、両面テープを使用して 3 軸力計に固定した。摩擦測定は、フィルム搬送方向に摺動実験を行い、指の腹をナノシートに押し当てて摺動させた。摩擦測定中の摺動速度をできるだけ一定に保つため、摺動距離は 20 mm に設定し、安定した測定値を得るために 5 秒間摺動させた。また測定前には、皮膚に発生した汗や油分を除去するため、試験指を石鹸で清潔に洗い、エアスプレーを使用して指表面の水分を除去した。

本実験における変化パラメータは、ナノシートの垂直荷重と膜厚であり、垂直荷重については 0.4, 0.8, 1.0, 2.0 N、膜厚については 50, 100, 150, 200 nm のときの動摩擦係数を測定した。図 4(a), (b) に測定値を示す。同図(a)より、赤枠で囲まれた部分を測定値とし、青枠や緑枠など垂直荷重をかけ始めたときとかけ終わったときの値は測定値から除外した。測定により得られた F_x と F_y の合成力を摩擦力 F_t とした。合成摩擦力 F_t は、摩擦力（滑り方向） F_x と F_y を式(1)に代入して算出した。一方摩擦係数は、摩擦力 F_t と F_z を式(2)に代入して算出した。

$$F_t = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (1)$$

$$\mu = F_t/F_z \quad (2)$$

この時、図 4(b) に示すようにスティックスリップが発生した測定結果は計算から除外した。

次にナノシートの剥離試験について説明する。用意したナノシートのうち 50, 100, 150 nm のナノシートをシリコン基板に貼り付けた。貼り付けたナノシートは 10×20 mm である。また、こ

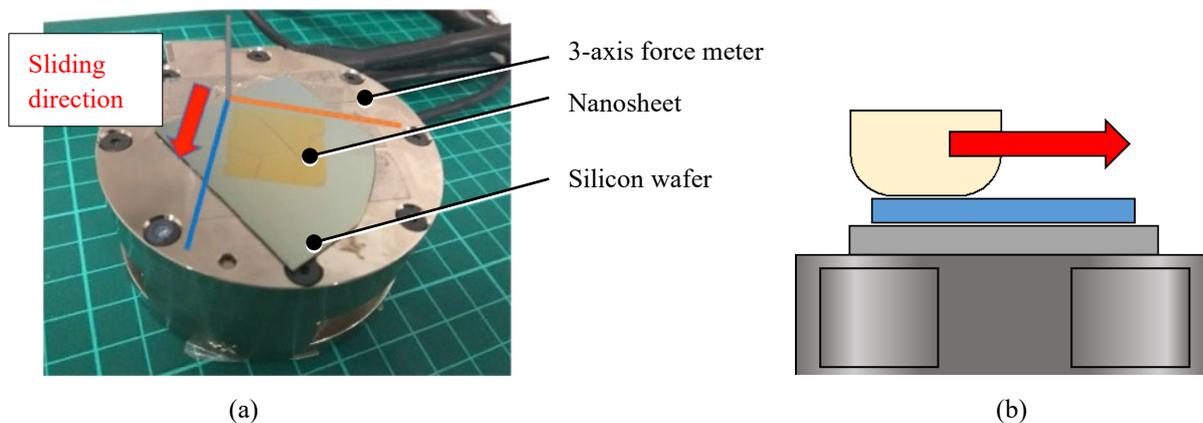


Figure 3 Friction measurement in vivo and Friction method; (a) This friction measuring instrument can measure loads on three axes., (b) The measuring instrument and the silicon substrate were attached with double-sided tape so that the silicon substrate would not shift when sliding.

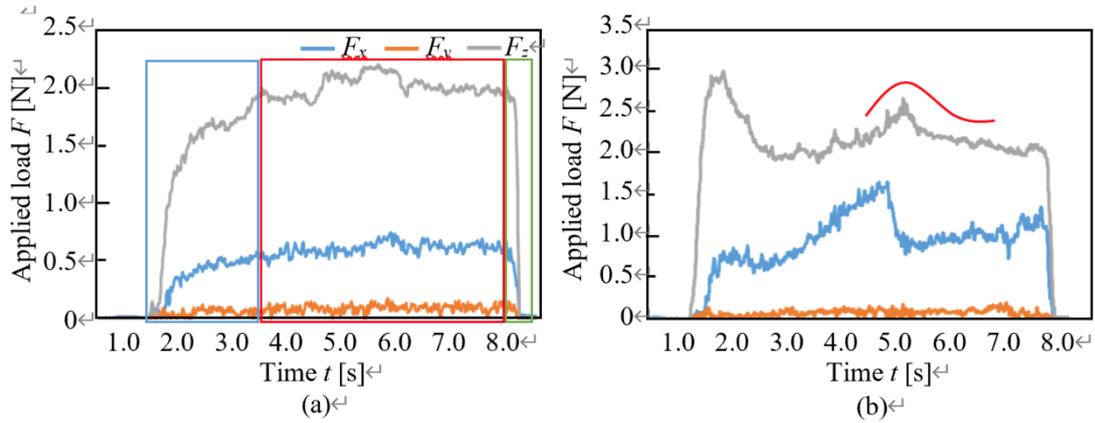


Figure 4 Friction force measurement (a) Main data; (b) Not included as data

の剥離試験ではテープテスト（グリッドパターンテスト）が用いられており、グリッドパターンは2 mm×2 mm のマス目 50 個である。図 5 に剥離試験方法を示す。90°テープテストでは、ロードセルでテープを引っ張り、テープを引っ張りながら試験片を移動させて 90°を維持するようにした。このとき、試験片は引っ張ったときに台座から浮き上がらないように 5 kg の鉄板に固定した。引張速度は 10 mm/s である。剥離試験後、ナノシートがシリコン基板からどれだけ剥がれたかを画像処理ソフト（ImageJ）で測定した。測定時には、2 値化処理により 2×2mm の各パターンがどの程度剥がれたかを判定する値が 50%以上剥がれたものとし、合計 50 パターンの平均をとって剥離率を算出した。

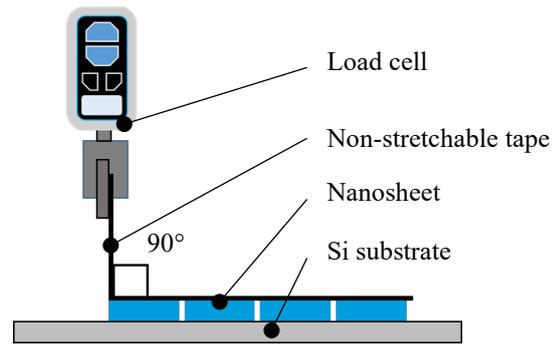


Figure 5 90°peeling test (Grid pattern test)

最後にナノシートの表面修飾を図った。本研究では、鮫肌のモールド（型）を作製し、その上にスピコート法でナノシートを作製し、ナノシートの表面修飾を施した。

4. 研究成果

図 6(a), (b)にナノシートの膜厚測定結果を示す。膜厚測定結果から、溶液濃度 10 mg/ml と 20 mg/ml で周速比 0.3 と 0.6 で均一な膜厚のナノシートが製作できた。ただし、同図(b)の周速 1.2 は誤差が大きい結果となった。溶液濃度の上昇と周速比 1.0 以上の条件でフィルムとマイクログラビアロールの間に形成されるビードの表面張力が不安定になり、ビードを安定して維持できなかったためである。

図 7 に摩擦実験をした観察画像を示す。同図(a) は摺動前を、同図(b) は摺動後の画像である。

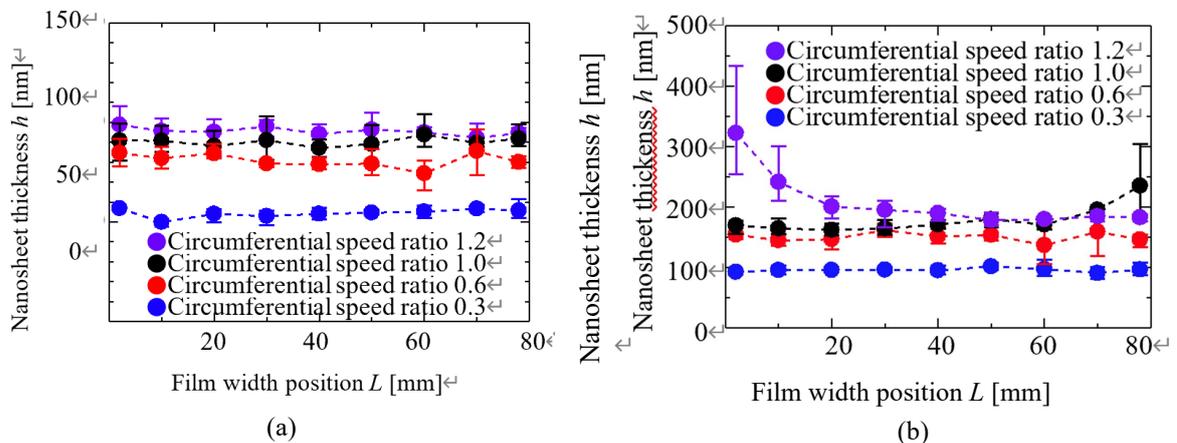


Figure 6 Nanosheet thickness measurement result (a) Solution concentration is 10mg/ml; (b) Solution concentration is 20mg/ml.

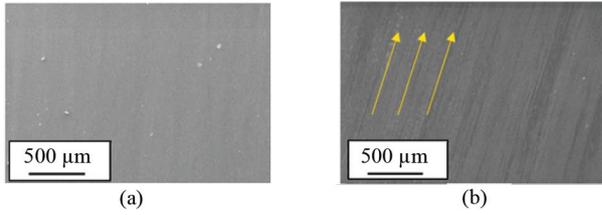


Figure 7 Nanosheet surface before and after the experiment; (a) Nanosheet surface before sliding; (b) Nanosheet surface after sliding.

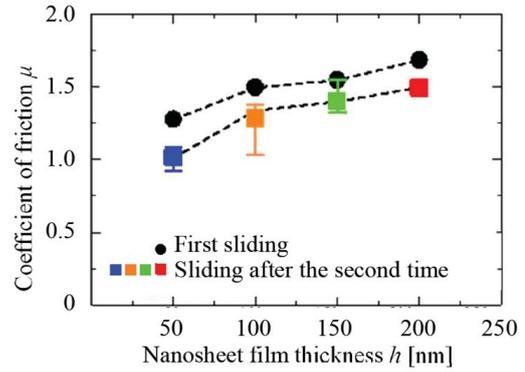


Figure 8 Coefficient of friction in thickness of nanosheet

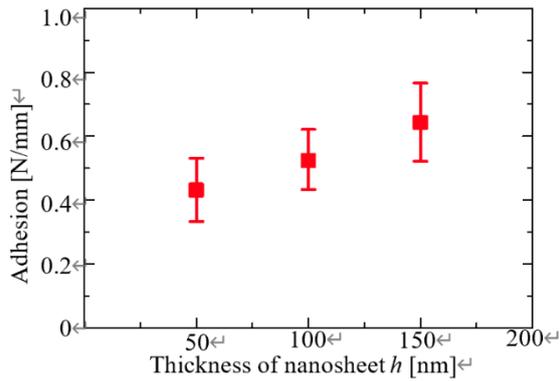


Figure 9 Adhesion at the film thickness of each nanosheet

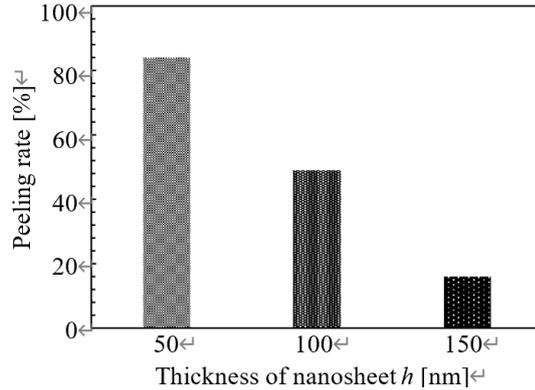


Figure 10 Peeling rate at the film thickness of each nanosheet

同図 (b) からは、摺動方向に沿って油分を含んだ摩耗痕が観察できる。しかしながら、同図(b)に示したナノシート表面には指の削りカスのような摩耗痕は見られなかった。そのため、この摩耗痕は油によるものと考えられる。この油には皮脂や汗が含まれていると考えられる。

図 8 は、垂直荷重 $F_z=1.0\text{N}$ のときの各膜厚における摩擦係数を示したものである。横軸はナノシートの厚さを、縦軸は摩擦係数を示している。丸いプロットは各膜厚の最初の摺動を示し、四角いプロットは最初の摺動後の摺動による摩擦係数を示している。同図から、ナノシートの膜厚が厚くなるにつれて、摩擦係数も増加していることがわかった。摩擦係数の増加は、100nm 以降の膜厚の不均一性により、ナノシートと指先との接触面積が増加したためと考えられる。また、1 回目の摺動後よりも 2 回目の摺動後のほうが摩擦係数は低かった。1 回目のスライドと 2 回目のスライドの摩擦係数が異なる理由は 2 つ考えられる。1 つ目は、ナノシートを指でスライドさせたときに生じた摩耗痕によって表面がわずかに削られ、指紋との接触面積が変化するため摩擦係数が低下した可能性がある。2 つ目の理由は、指表面から分泌された皮脂が、1 回目のスライド後にナノシート表面に残留した可能性が考えられる。

図 9 に 90°テープ剥離試験の結果を示す。このグラフは各膜厚における密着性を示している。プロットは 4 回の試験の平均を示し、エラーバーは平均偏差を示している。同図から、ナノシートの厚さが増すにつれて密着性が直線的に増加していることがわかる。

図 10 は各膜厚の剥離率を示している。縦軸は剥離率[%]を、横軸は膜厚 h [nm]を表している。同図からは膜厚が増すにつれて剥離率が低下していることがわかった。図 8 と図 9 を見ると、膜厚が薄いほど密着性が低く剥がれやすく、一方で、膜厚が厚いほど剥がれにくく密着性が高くなる傾向があることがわかった。

図 11 に PDMS を用いて作製した鮫肌の型を示す。本研究では、これらの鮫肌の上にナノシートを貼付し、細菌の接着について検討した。その結果、ナノシートを追加するだけで抗菌活性が向上することが確認された。

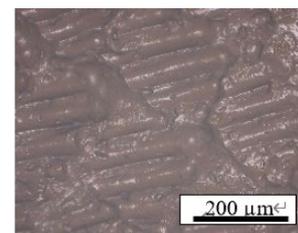


Figure 11 SEM image of surface-modified nanosheets

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shunsuke Nakano, Sheng Zhang, Mohd Danial Ibrahim, Yuta Sunami	4. 巻 1
2. 論文標題 Tribological Characteristics Between Polymer Nanosheets and Human Skin	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of ASME Annual Conference on Information Storage and Processing Systems	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakano Shunsuke, Ibrahim Mohd Danial, Sunami Yuta	4. 巻 10
2. 論文標題 Manufacturing of Poly-DL-Lactic Acid Nanosheets and Evaluation of Tribological Characteristics between Nanosheet Surfaces and Fingers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Applied Science & Process Engineering	6. 最初と最後の頁 109 ~ 118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.33736/jaspe.5836.2023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Shunsuke Nakano, Alyssa Asong Anthan, Mohd Danial Ibrahim, Dayang Salyani Abang Mahmod, Awang Ahmad Sallehin Awang Husain, Ngui Sing Ngnieng, Yuta Sunami	4. 巻 1
2. 論文標題 EVALUATION OF ANTIBACTERIAL ACTIVITIES FOR POLY-DL-LACTIC ACID NANOSHEET ON THE BIOMIMETIC SHARKSKIN	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2023 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 亢 雲錦、砂見雄太
2. 発表標題 微細孔構造を有する感圧ナノシートの作製とその機能性の評価
3. 学会等名 日本機械学会 関東学生会 第62回学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 微細孔構造を有する感圧ナノシートの特性評価
2. 発表標題 丸 雲錦、砂見雄太
3. 学会等名 ウェブハンドリング技術研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松本香南、砂見雄太
2. 発表標題 ナノシートへの微細加工に関する研究
3. 学会等名 ウェブハンドリング技術研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kanna Matsumoto, Danial Ibrahim, Yuta Sunami
2. 発表標題 Continuous Micropore Processing Into Nanosheets Using Imprinting Method
3. 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Internatioal Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安倍悠朔、折茂里樹、平岩、悠里、岡村陽介、砂見雄太、松田佑
2. 発表標題 熱流体計測のための感圧ナノシートの開発と特性調査
3. 学会等名 日本機械学会 IIP2022 情報・知能・精密機器部門 (IIP部門) 講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野田奈々夏、砂見雄太
2. 発表標題 指とナノシート間の摩擦力測定に用いる指模型の作製と評価
3. 学会等名 日本機械学会 関東学生会第61回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本香南、砂見雄太
2. 発表標題 高分子超薄膜への連続ナノインプリントによる多孔質ナノシート作製
3. 学会等名 日本機械学会 IIP2022 情報・知能・精密機器部門 (IIP部門) 講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Syunsuke Nakano, Mohd Danial Ibrahim, Yuta Sunami
2. 発表標題 Manufacturing of Poly-DL-Lactic Acid Nanosheets and Evaluation of Tribological Characteristics between Nanosheet Surfaces and Fingers
3. 学会等名 The 14th International UNIMAS Engineering Conference 2022(EnCon2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Syunsuke Nakano, Yuta Sunami
2. 発表標題 The manufacturing of PDLLA nanosheets using micro-gravure printing method for the roll-to-roll
3. 学会等名 The 11th International Conference on Flexible and Printed Electronics
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本香南、砂見雄太
2. 発表標題 ロールナノインプリント法を用いたナノシートの微細孔加工(圧力および搬送速度の影響)
3. 学会等名 関東学生会第60回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本香南、砂見雄太
2. 発表標題 ロールナノインプリント法およびプレス加工法を用いたナノシートへの微細孔加工
3. 学会等名 東海大学マイクロ・ナノ啓発会【Tune】第13回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shunsuke Nakano, Alyssa Asong Ananthan, Danial Bin Ibrahim, Yuta Sunami
2. 発表標題 Evaluation of Tribological Properties of Biomimetic Shark Skin with Nanosheet during Human Fingerprint Sliding
3. 学会等名 ITC Fukuoka 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

橋本・落合・砂見研究室 http://ns.mech.u-tokai.ac.jp/~hashimoto_lab/ 橋本・落合・砂見研究室 http://www.mech.u-tokai.ac.jp/~hashimoto_lab/index.html 橋本・落合・砂見研究室 http://www.mech.u-tokai.ac.jp/~hashimoto_lab/index.html
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
マレーシア	Universiti Malaysia Sarawak			