

3次元ナノ・マイクロ構造の創成とバイオミメティクス・医療への応用

研究代表者：青柳 誠司
研究分担者：新井 泰彦・大村 泰久・新宮原 正三・福永 健治・
山口 智実・伊藤 健・稲田 貢・鈴木 昌人・
高橋 智一
学外研究分担者：高澤 知規・歌 大介

1. はじめに

青柳誠司*1

本プロジェクトは、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の支援を受け、ナノ・マイクロメートルスケールの3次元微細構造の創生技術とバイオミメティクス技術の融合による新学問分野の確立、およびその医療デバイスおよびメカトロニクス・ロボティクス関連のデバイス開発への応用を目的として実施している。本プロジェクトの実施機関は2015年度から2019年度であり、本年度はその4年目にあたる。

プロジェクトは、昨年度までに引き続き13名の研究者で遂行した。組織構成も前年度までと同様にグループ制を取り、グループ毎に担当分野についての研究を遂行した。グループの名称及び所属する研究者は、以下の通りである。ナノ・マイクロ加工グループ(青柳、新宮原、新井、山口)、医療応用グループ(福永、大村、稲田、高澤、歌)、バイオミメティクスグループ(伊藤、鈴木、高橋)。

以下に、プロジェクトの進捗状況を簡単に記す。バイオミメティクスグループでは、特に蚊の穿刺吸血行動をメカニズムの解明、およびそれを応用した微細針の穿刺方法の開発を実施した。従来研究においては、作製した微細針をマウスに穿刺する際に諸々の問題が発生していたが、開発した穿刺方法の採用によりこの問題に解決が見られた。また、3次元光造形装置を利用してヤモリの毛を模擬したナノスケール吸着構造を作製、その効果を実証した。

タコの吸盤を模倣したロボット用グリッパについては、より実用環境を想定した把持対象を設定し、把持力を向上させるためにグリッパの改良を実施した。グリッパに形成する吸盤に水袋を付与した結果、従来では把持できなかった柔軟な物体も把持できるようになった。

また、蟬の羽を模倣した細菌を寄せ付けない表面構造

*1 システム理工学部教授 工学博士

の研究も継続した。クマゼミの羽表面に蛍光タンパクを生成可能な大腸菌を滴下し、その大腸菌がナノ構造上で死滅する過程を1細胞ごとに観察することで、クマゼミの羽根の殺菌作用に3つの過程があることを見出した。

ナノ・マイクロ加工グループにおいては、金(Au)薄膜のパターンを触媒とした湿式エッチングにより、シリコン(Si)に高アスペクトの穴を形成することに成功した。本手法は、Si基板への貫通穴(TSV)を低コストに形成する手法として期待される。

また、昨年度に引き続きNi鋳型を用いたナノインプリント法により、ダイヤモンド表面へ微細な溝形状を形成する手法の開発を行った。本年度は、加工量増加のための繰返し加工プロセスの確立を試みた。

3次元光造形装置を利用して作製した極微小光モータ動作の研究についても継続しており、本年度は複数のモータをギアでリンクさせる手法について開発した。上記したプロジェクトの成果について、次章より各担当者が具体的に記述する。

2. 微細針を用いた新しい採血方法の提案—往復回転運動の利用、血管可視化—

青柳誠司、鈴木昌人*2、福永健治*3
高澤知規*4、歌大介*5

2.1. 緒言

昨年度までに引き続き、穿刺時の痛みの少ない低侵襲性の微細針の開発の一環として、穿刺抵抗を低減する穿刺方法を探求した。従来研究においては、2本の針を交互に振動させることで穿刺抵抗を低減することに成功していたが(図1(i)参照)、本手法は針の構造と穿刺動作が共にやや複雑であった。^{1,2)}そこで、今年度はより単純な機構による穿刺抵抗の低減を目指し、1本の針をモータ

*2 システム理工学部准教授 博士(工学)

*3 化学生命工学部教授 水産学博士

*4 群馬大学医学部付属病院集中治療部講師 博士(医学)

*5 富山大学薬学部助教 博士(医学)

で回転させる手法を採用した（図1(iii)参照）。結果、本手法により穿刺時の針の座屈を防止し、同時に皮膚の窪みを防止することに成功した。また、一方方向に回転させるだけでなく、一定角度毎に回転方向を切り替える“往復回転”を針に付与した結果、往復回転の方が穿刺抵抗の低減効果が大きいことが分かった。本報告においてその詳細を報告する。

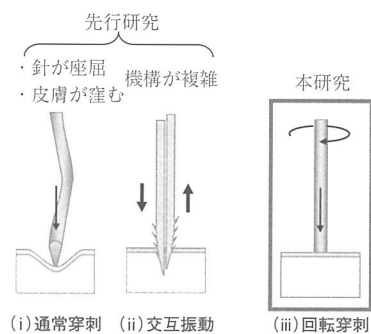


図1. 提案する微細針の穿刺方法

2.2. 実験手法

直径100 μm の中実ステンレス製針（セイリン社製鍼灸針）の根本をステッピングモータに固定し、更にステッピングモータを電動リニアアクチュエータに設置することにより、一定速度で前進・後退させながら針を進行方向（針の長手方向）に垂直な方向へ回転させる穿刺機構を用いた。また、ステッピングモータの回転速度および回転方向をファンクションジェネレータにより発生させたパルス信号により制御した。穿刺速度および穿刺後の後退速度は、0.1 mm/sとした。穿刺対象はヤング率約0.4 MPaのポリジメチルシロキサン（polydimethylsiloxane, PDMS）製の人工皮膚、およびマウスの皮膚とした。PDMSは、一軸力覚センサに貼付した状態で穿刺することで、針穿刺抵抗を苦呈した。マウスを用いた実験は、関西大学化学生命工学部 動物実験委員会の承認の下で実施した（承認番号：1408, 1509, 1606, 1707）。

2.3. 実験結果

(1) 一方方向回転の付与効果の評価結果

微細針の回転数を変化させてPDMS製人工皮膚へ穿刺した際の針の穿刺移動量と穿刺抵抗力の関係を図2(a)に、微細針の穿刺深さが2 mm（最大値）の際の人工皮膚表面の状態（窪み）を図2(b)にそれぞれ示す。この結果が示す通り、回転の付与により穿刺抵抗力和皮膚のたわみが共に低減されることが分かった。穿刺抵抗力は、回転速度に対して単調に減少し、180 rpm付近でほぼ飽和した。このような結果が得られたのは、針を回転させることで微細針と穿刺対象の間の摩擦力が低減することで、穿刺抵抗力が減少したためであると考察される。

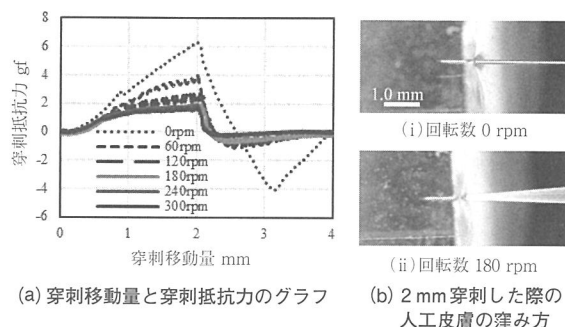


図2. 一方方向へ回転させながら針を穿刺した際の穿刺抵抗力和人工皮膚の窪み

微細針の回転速度を180 rpmに固定し、マウスへの穿刺した様子を観察した。結果を図3に示す。マウスの皮膚が微細針の回転にねじれ、穿刺箇所付近の血管から血液が逃げてしまう様子が観察された。これは、人工皮膚では見られない現象であった。この結果より、マウスの皮膚の弾性率が人工皮膚の弾性率より小さい可能性、およびマウス皮膚と針の間の摩擦力が針と人工皮膚の間の摩擦力より大きい可能性が示唆される。

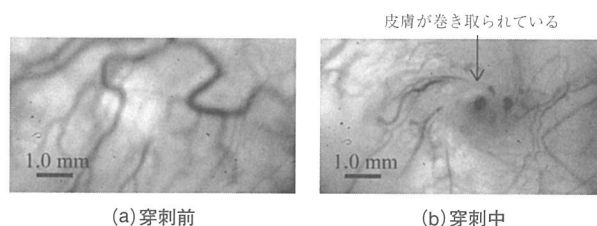


図3. 一方方向に針を回転させながら針を穿刺した場合のヌードマウスの皮膚の様子

(2) ねじりの付与効果の評価結果

微細針に往復回転を付与しながらPDMS製人工皮膚に穿刺し、その際の抵抗力を測定した。本実験においては、回転速度を180 rpmに固定し、回転方向を切替えるまでの回転角度（本報告においてはこれを“ねじり量”と呼称する）を変化させて複数回実験を実施した。その結果を図4(a)に、穿刺深さが2 mmの時点における人工皮膚表面の様子を図4(b)に示す。この結果より、針のねじり量を大きくすることで穿刺抵抗力和穿刺時の人工皮膚表面の窪みが低減していくことが分かった。これは、ねじり

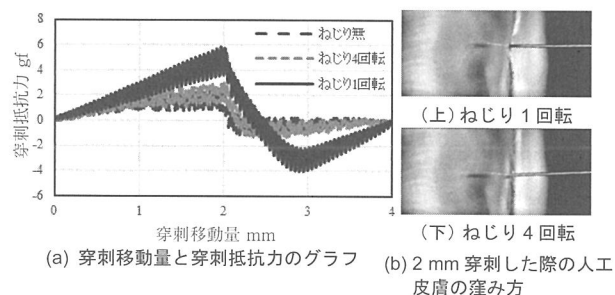


図4. 針にねじりを付与しながら穿刺した際の穿刺抵抗力和人工皮膚の窪み

量を大きくすることにより微細針と穿刺対象の間に滑りが発生し易くなることが原因であると推測される。

針に往復回転を付与した状態でマウスの皮膚へ穿刺し、皮膚に与える影響を観察した。針を回転させずに穿刺した場合の結果を図5に、ねじりを付与しながら穿刺した場合の結果を図6にそれぞれ示す。ねじり量は1140°(4回転)とした。回転を付与しない場合、穿刺途中で針がマウスの皮膚を巻き取り、その影響により針の進行方向がずれていく様子が観察された(図3)。一方、微細針がマウスの皮膚を巻きとることなく穿刺される様子が観察された(図5)。また、抜針後に穿刺跡から出血される様子も観察された(図6)。

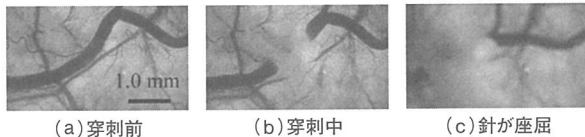


図5. 回転を付与していない針を穿刺した場合のヌードマウスの皮膚の様子

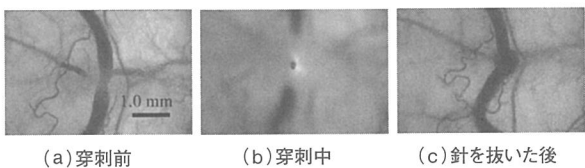


図6. ねじりを付与した針を穿刺した際のヌードマウスの皮膚の様子

3. ヤモリを模倣した2段構造を持つ微細毛作製と吸着力の評価

青柳誠司、鈴木昌人

3.1. 研究背景

ヤモリは足裏に生えている複雑な2層構造を有する微細毛によりファンデルワールス力を発生させ、様々な壁面に吸着していると言われている³⁾。このヤモリの足裏の微細毛を模倣する研究は数多く行われているが⁴⁾、未だ完全な再現には至っていない。本報では、3D光造形装置を用いてヤモリの毛を再現した微細毛を作製した。また、ナノインプリント技術によりCyclo Olefin Polymer (COP) フィルムへその構造を転写する技術の開発を実施した。

3.2. 微細毛の作製

3D光造形装置(Nanoscribe社, Photonic Professional GT, 水平分解能:200 nm, 垂直分解能:800 nm)を使用してヤモリの微細毛を模倣した構造を作製した。作製した微細毛の設計図を図7に、作製した微細毛の電子顕微鏡(SEM)像を図8に示す。

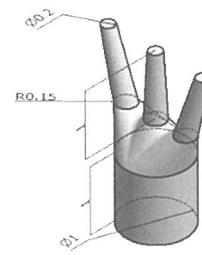


図7. 3D光造形法により作製した微細毛構造の設計図

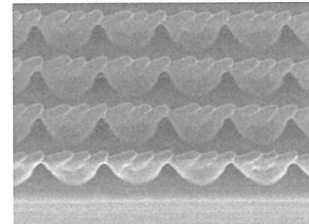


図8. 3D光造形法により作製した微細毛構造のSEM像

COPフィルムへの転写工程を図9に示す。ナノインプリント装置を使用してシリコン製の型の形状(直径30 μm、ピッチ40 μmの突起)を転写する。ここで、型温度は175℃、押し付け圧力は2.0 MPaとした。その後、Alを陽極酸化することで得られるアルミナのナノポーラス構造(AAO)を型として、先に形成したCOPの突起先端にさらに細かい微細毛構造を転写した。作製に成功した部分のSEM画像を図10に示す。一部で突起の先端同士が凝集しているものの、概ね目的とした形状を得ることに成功した。

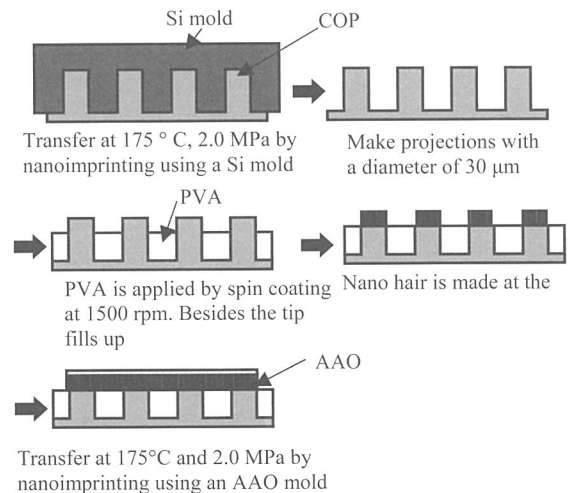


図9. ナノインプリント法を用いたヤモリ脚裏の微細毛を模倣したナノ構造の作製法

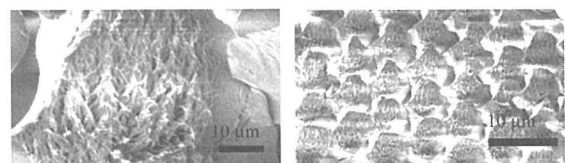


図10. ナノインプリント法を用いて作製したナノ微細毛のSEM像

3.3. 微細毛の吸着力評価結果

作製した微細毛の吸着力を実際に測定した。測定方法としては、微細毛をパリレンフィルム（長さ 40 mm、幅 1 mm、厚さ 10 μm ）に吸着させた後に引張り、フィルムのたわみから吸着力を計算した。3D光造形装置で作製した微細毛構造、ナノインプリント法により作製したCOP製微細毛構造、および実際のヤモリの微細毛を評価対象とした。

3D光造形装置で作製した微細毛については、パリレンフィルムへの吸着が見られなかった。これは、先端の微細毛が凝集してしまい、微細毛としての機能が失われてしまったこと、毛の長さが短くフィルムに対する接触の柔軟性が不十分だったことが原因であると考察される。COPにより作製した微細毛は、フィルムに吸着する様子が観察され、その吸着力の平均値は 2.65 mN/mm^2 であった。ヤモリの微細毛の吸着力は、約 0.3 mN/mm^2 と評価された。

3.4. 結論

3D光造形法またはナノインプリント法を利用して、ヤモリの脚裏の微細毛を模擬した2層構造を有する吸着構造を作製し、その吸着力を評価した。3D光造形法により作製した微細毛の先端部分で凝集してしまい、吸着力を発揮することが出来なかった。一方、ナノインプリント法により作製した微細毛は、対象に吸着する様子が観察された。今後は、3D光造形法により作製する微細毛構造の設計の見直しを行うと共に、吸着力の測定方法についても改良を行う予定である。

4. 柔軟物把持に適した水袋を有するタコ模倣型真空吸着グリッパの開発

高橋智一^{*6}

4.1. 研究背景

物流業界における搬送の自動化では、液体の入った容器などの柔軟物把持が課題となっている。柔軟物は把持中に形状が変化するので、持ち上げに最適な把持位置が変化する。例えば、吸着パッドを用いた場合、持ち上げ前は物体の重心位置を把持できる。また、吸着パッドを物体に押し付ければ密着できる。しかし、物体を持ち上げるとその重心位置が変化して吸着部にモーメントが生じる。また、重心位置だけでなく物体の表面に凹凸が生じるため、吸着パッドが剥離しやすい。

我々は、これまでタコの吸盤を模倣した真空吸着グリッパを提案した。このグリッパは、形状が複雑な金属材料などを把持できる。しかし、柔軟物は把持できなかつ

た。これは、グリッパの剛性変化が原因である。吸引前のグリッパは柔軟であるが、吸引時にグリッパの剛性が高くなる。このため持ち上げ時の物体の形状変化にグリッパが追従できない。そこで本研究では、柔軟な構造である水袋を吸着面に取り付けたグリッパを提案する。水袋は柔軟性と弾性を有するので、持ち上げ後の物体の形状変化にも追従できる。なお、水袋を用いたロボットハンドの研究はいくつか報告されている。本稿では、水袋の形状追従性の効果を調べるため、水袋を有する吸着グリッパを試作した。グリッパを用いて、詰め替え用の液体洗剤などの物体を把持できるか調べた。

4.2. 吸着原理

基本となる原理は、従来のタコ模倣型吸着グリッパと同じである。グリッパを物体に密着させた後、グリッパ内部を負圧にする。負圧にすると膜が引き上げられてグリッパと物体の間の体積が増える。体積が増えるので、ボイルの法則から空間の圧力が下がる。膜の復元力は小さいので、空間の圧力は減圧装置の到達真空度と同程度になる。また、復元力が小さいので吸着時の膜の変位は小さい。物体が柔軟物の場合、物体を持ち上げると凹凸が生じる、および物体の重心が移動するが、水袋の形状追従の効果により物体を吸引し続けられる。なお、物体を剥離する場合はグリッパ内圧を大気圧に戻す。

本稿で作製したグリッパは、水袋と従来のタコ模倣型吸着グリッパの組み合わせになる。従来のグリッパの外径および薄膜の直径は、それぞれ45 mm、26 mmである。グリッパは、カップ状シリコーンゴムにガラスビーズを充填した構造をもつ。このグリッパの構造および作製法は従来と同様である。水袋は、リング状シリコーンゴムの袋に水を充填した構造である。グリッパに取り付けたリング状の水袋の外径と内径はそれぞれ45 mm、26 mmである。水袋の厚さおよび高さは、それぞれ0.5 mm、1.8 mm程度であった。充填した水の質量は2.8 gである。

4.3. 把持試験

水袋の形状追従性を確かめるため作製したグリッパを用いて、柔軟物把持の成功回数を調べた。柔軟物は7種類とした。柔軟物にグリッパを垂直に押し当てるため、ハンドプレス機を用いた。ハンドプレス機の上端にロードセルと吸着グリッパを取り付ける。ロードセルとグリッパの間には摺動機構がある。グリッパは吸着と同時に収縮するが、その収縮で物体からグリッパが剥離する。これを防止するために摺動機構を用いる。グリッパが収縮しても摺動機構が下がるため、物体とグリッパの位置は変化しない。ロードセルの出力はアンプで増幅した後、

^{*6} システム理工学部准教授 博士（工学）

データロガーに記録する。なお、真空ポンプの到達真空度は 26.6 kPa である。吸着と剥離の切り替えは、三方向弁で操作する。グリップを物体に押し付ける力は、1～3 N とした。試験回数は、各条件につき 5 回とした。把持成功の条件は、物体を持ち上げた状態を 5 秒間維持できた場合とした。比較のため水袋のない吸着グリップを用いて同様に試験した。

把持成功の回数を表 1 に示す。水袋のない吸着グリップは、いずれの物体も把持できなかった。水袋を有する吸着グリップは質量が、810 g の対象物 (g) を除く柔軟物を把持できた。対象物 (f) は、質量 470 g の詰め替え用液体洗剤である。対象物 (g) は、ポリエチレン製の袋に液体を充填した構造をもつ。持ち上げ後の対象物の変形が大きいため、対象物 (g) を持ち上げられなかったと考えられる。なお、吸着グリップを手で操作すると対象物 (g) を持ち上げられたので、対象物 (g) を把持する吸着力があると考えられる。

表1. 把持成功回数

Pressing force [N]	Flexible objects						
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
1	5	5	5	5	4	4	0
2	5	5	5	5	5	5	0
3	5	5	5	5	5	4	0

4. 4. 結論

柔軟物を把持するため、水袋を有するタコ模倣型吸着グリップを提案した。水袋は把持における柔軟物の変形に追従する。これによりグリップは柔軟物に密着できる。そこで、水袋を有する吸着グリップを試作した。グリップの外径は 45 mm、水袋の外径および内径は 45 mm、26 mm である。試作したグリップを用いて 7 種類の柔軟物を把持した。水袋のないグリップは、すべての対象物を把持できなかった。それに対して、水袋を有する吸着グリップは 1 種類を除いて把持できた。このとき、把持できた質量の最大値は 470 g であった。また、着色した水袋を用いて観察して柔軟物の変形に追従することを確かめた。タコ模倣型吸着グリップの底面に柔軟なパッドを取り付ければ、柔軟物の把持に有効に働くことがわかった。

5. 天然および人工ナノ構造による殺菌効果の細胞レベル観察

伊藤健*7

5. 1. はじめに

マイクロ・ナノ構造の視点で生物を見てみると、昆虫を代表として様々な優れた機能を持っていることが明らか

かにされてきた。セミやトンボなどの昆虫の翅には無数のナノメートルオーダーの寸法を持つ柱（ピラー）構造が存在している。これらの構造は、自己組織化により形成された非常に特有の構造である。ナノピラー構造は、ロータス効果による撥水性を示すほか、光に対する無反射構造としても知られている。さらに近年、この構造が持つ物理的な特性が殺菌作用を示すことが報告された^{6,7)}。殺菌のメカニズムは、ナノ構造と細菌の細胞膜との相互作用であると推測されている。特に、細胞膜の薄いグラム陰性菌に効果があると言われているが、そのメカニズムは解明されていない。

近年、抗菌剤に耐性のある細菌に感染して死亡するケースが増加している。WHO の報告では、年間約 70 万人が抗菌剤耐性感染症により死亡しており、2050 年にはその数は 1000 万人にまで増加すると危惧されている⁸⁾。これまでの抗菌剤は化学的作用によるものであったため、細菌が化学物質への耐性を得ると効果が無くなってしまふ。一方、ナノ構造に起因する抗菌作用は物理的な作用であるため、持続性があり、高い殺菌効果が期待できる。

これまでの抗菌・殺菌効果を評価する手法として、JIS (ISO) 規格による 24 時間培養後の菌の増殖具合を評価するマクロな手法と、細菌 1 個 1 個の作用を見るミクロな手法がとられてきた。前者の手法については、2 年前の報告で述べており⁹⁾、人工的なナノ構造でも抗菌性を発揮することを示した。後者については、昨年 の報告で記載した¹⁰⁾。そのコンセプトは以下のとおりである。従来のミクロな抗菌作用を評価する実験では、細胞外膜の損傷を評価する試薬 (PI/Syto9) を用いているため、真に細胞が死に至っていることを証明していない。そのため、グラム陰性菌として知られる大腸菌に対して遺伝子組み換え技術を用いて、細胞内に蛍光たんぱく質を生成させ、その蛍光たんぱく質の漏れを評価することで細菌の内液の漏れを直接的に観察する手段を構築した。本年は、セミの翅および人工的に模倣したナノ構造での蛍光強度の現象を細胞レベルで詳細に解析したので報告する。

5. 2. 評価法

試験サンプルとして用いたセミの翅は、クマゼミ (学名: *cryptotympana facialis*) であり、学内で採取した。翅は、エタノールで滅菌してから実験に用いた。また、蛍光タンパク質 (mCherry) を生成できるように遺伝子を組み換えた大腸菌を用いて実験を行った。また、クマゼミの翅にあるナノ構造を Si 基板に人工的に模倣したサンプル (以下 Si 基板と記載する) を作製した⁹⁾。セミの翅または Si 基板をスライドガラスに固定化した後、細胞内に蛍光タンパク質を生成させた大腸菌を含む菌液を

*7 システム理工学部教授 博士 (工学)

セミの翅上に滴下した。その後、カバーガラスを被せることで菌液をセミの翅全体に広げた。位相差顕微鏡と蛍光顕微鏡を用いた同一視野の観察を行った。この時、重力の影響を避けるため、サンプルの観察は上下をひっくり返して行った。なお、Si基板では光を透過しないため位相差像の観察は行えない。

5.3. 結果と考察

大腸菌の蛍光強度の変化を1分毎に観察した。図11(a)にセミの翅上に滴下した後すぐと30分後の位相差像、蛍光像を示す。位相差像と蛍光像により同一の大腸菌の観察したところ、複数の細胞において蛍光像の消失が観測された。この結果は、セミの翅に付着した大腸菌の細胞膜がナノ構造により破壊され、細胞膜内の蛍光タンパク質が流れ出したためと考えられる。同様に、Si基板でも蛍光の消失が確認された(図11(b))。次に、視野中の20個の細胞の1つ1つの細胞について時間に対する蛍光強度変化を評価した。図12(a)にはセミの翅上での結果、図12(b)にはSi基板上での結果を示す。図からわかるように、いずれの場合でも時間とともに蛍光強度が低下した。また、この蛍光強度の低下には大きく分けて3つの領域があることが分かった。(1)蛍光強度が変化しない領域。この状態は、付着から数分のみで観察され、細菌によっては全く観察されないこともある。これは、細菌が付着しただけでナノ構造との相互作用が発生していない状態を示している。セミの翅では、20個中6個、Si基板では20個中5個が観察され、無視できない

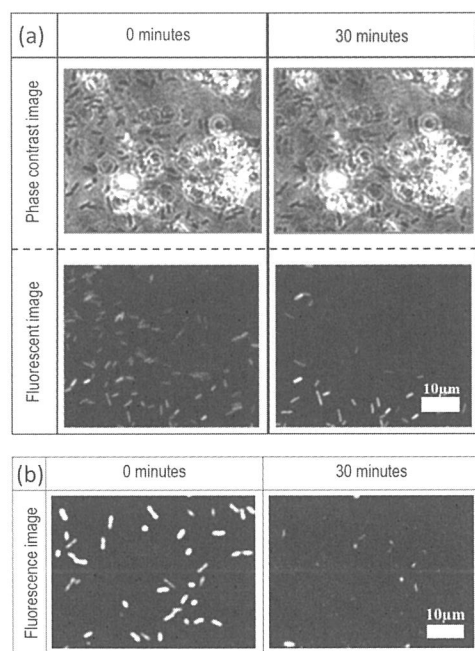


図11. 観察開始直後(左)と30分後(右)の位相差顕微鏡像(上段)、並びに蛍光顕微鏡像(中段)(スケールバー: 10 μm)
(a)セミの翅上での観察結果; (b)Si基板上での観察結果

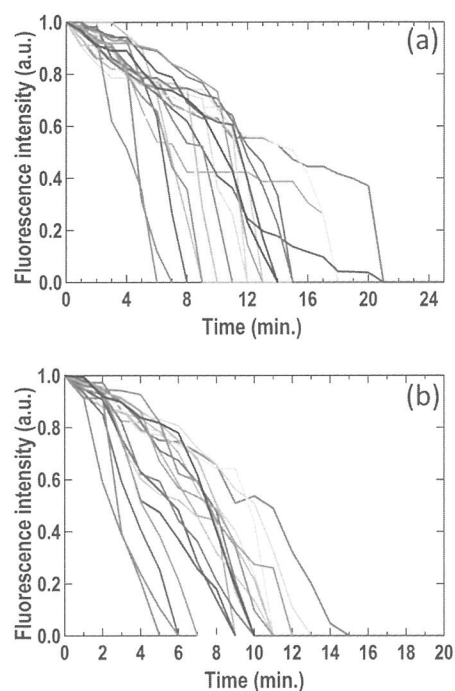


図12. 蛍光強度の時間変化
(a)セミの翅上
(b)Si基板上での観察結果

割合で生じていると考えられる。(2)蛍光強度が徐々に低下する領域。蛍光強度の低下が緩やかであり、細胞内液が少しずつ漏れ出していることを示している。(3)蛍光強度が急激に低下する領域。この時、2分程度で急激な蛍光消失を示す。(2)、(3)の過程における蛍光消失の時定数を K_2 、 K_3 と記述すると、セミの翅の K_2 、 K_3 は、それぞれ $4.9 \times 10^{-2} [\text{min}^{-1}]$ 、 $3.6 [\text{min}^{-1}]$ であった。一方、Si基板での K_2 、 K_3 は、それぞれ $5.1 \times 10^{-2} [\text{min}^{-1}]$ 、 $2.3 [\text{min}^{-1}]$ であった。これからの結果から、天然物、人工物によらず K_2 、 K_3 の値がほぼ一致していることから、同じ作用、つまりナノ構造と細菌の相互作用によって殺菌が生じていることが示された。これらの時定数は2桁も異なることから、別の現象であることが示唆される。また、蛍光自体の自然消失の時定数は K_2 よりもさらに1桁以上小さかったため、蛍光材料自体による影響は無視できる。

5.4. 今後の展望

本研究により大腸菌がナノ構造上で死滅する過程を1細胞ごとに観察することで、3つの過程があることがわかった。今後は、それぞれの過程で生じている現象を把握することで抗菌メカニズムの解明を行いたい。

6. 貴金属触媒を用いた湿式Si-TSVエッチングの検討

新宮原正三*⁸

3次元実装技術においては、Si貫通電極（TSV）形成の際に、ドライエッチング技術が用いられてきた。ボッシュプロセスがその代表例であるが、ドライエッチング法では高真空装置を用いるために装置コストが高く、またSiウエハ1枚ごとのエッチング処理となるのでスループットが低く、総じてコストが高いという問題があった。そこで我々は、湿式エッチングによるTSV形成を検討することとした。我々はバッチ処理（複数枚同時処理）が可能で、かつ異方性エッチングによる高アスペクト比構造の形成に適したMetal-assisted chemical etching（MacEtch）法に着目した。

用いた基板は、電気抵抗率 $1.0 \sim 100 \Omega \cdot \text{cm}$ のp型Si（100）基板である。MacEtchの前処理として、触媒である金薄膜パターンをリフトオフプロセスにより形成した。金触媒パターンの形状を図13に示す。

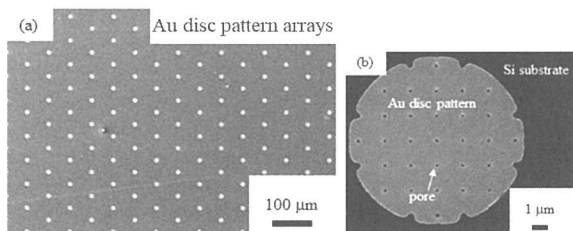


図13. 触媒用金薄膜パターン

直径は $10 \mu\text{m}$ であり、内部にエッチング液交換のための直径 $0.2 \mu\text{m}$ の微細孔を $1 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 感覚で配置した。なお、金薄膜（ 10 nm ）とSi基板の間にTi薄膜（ 10 nm ）を中間層として配置した。Ti層は、密着層およびAuとSiの合金反応を抑制する働きがある。

湿式Siエッチングにおいては、 HF （ 1.0 M ）と H_2O_2 （ 1.7 M ）の混合液にて、添加剤としてPEG（分子量 1000 ）を加えてエッチング速度及び形状の検討を行った。溶液温度は $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 、暗所にて 120 分エッチングした結果を以下に示す。図14にPEG添加なしの場合のエッチング形状SEM観察結果を示す。表面観察（図14(a)）より、一部のホールでは面内方向にエッチングが進んでいることがわかる。このような表面付近での水平方向エッチングが起きた割合は 15% 程度だった。また、面直方向にエッチングされた場合においても、断面観察によりエッチング方向が途中で変化してホールが屈曲している場合が多数見られた（図14(b), (c), (d)）。ほぼ垂直にホールがエッチングされた割合は、全体の 30% 程度であった。

次に、PEGを 5 ppm 添加した場合のエッチング後のホール形状観察結果を図15に示す。表面観察では、面

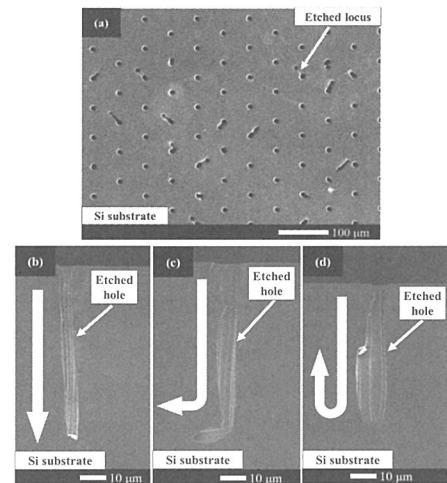


図14. PEG添加なしでのMacEtch後のホール形状

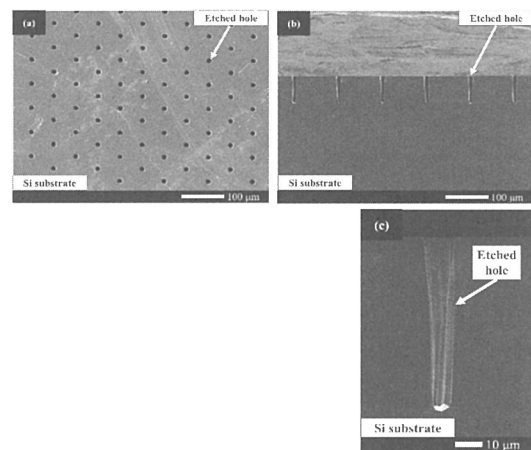


図15. PEG 5 ppm 添加した場合のMacEtch後の表面および断面形状

内方向のエッチングは殆ど認められない。断面観察において、殆どのホールがほぼ垂直にエッチングされたことがわかる。なお、PEG添加によってエッチング速度は約 10% 低下しており、PEGはSi表面に吸着してエッチング反応をやや抑制する効果を持つことが示された。ホールがエッチング中に屈曲した場合には、触媒である金薄膜が大きく変形したことが多い。これより、PEG添加とホール底部の金薄膜の変形抑止との相関が認められることとなるが、その詳細なメカニズムは今後明らかにしていく予定である。

7. ナノインプリント法による微細構造の創成

山口智実*⁹

7.1. 緒言

本研究は、ダイヤモンドが鉄・ニッケル等の金属と接触した際、ダイヤモンドの炭素が金属中へ拡散する現象を利用することにより、ダイヤモンド表面への微細パ

*⁸ システム理工学部教授 理学博士

*⁹ システム理工学部教授 工学博士

ターン形成技術の開発を目的とする。2018年度は、加工量増加のための繰返し加工プロセスの確立を試みた。

7.2. 繰返し加工プロセスおよび実験方法

(1) 繰返し加工プロセス

黒鉛の除去を含む加工プロセスを図16に示す。図16(a)のようにダイヤモンドと鉄を接触加熱させると、鉄との接触部でのみダイヤモンド表面は変質し、黒鉛の生成が確認される(図16(b))。この黒鉛は、鉄とダイヤモンドの接触を妨げていると考えられるので、酸化反応により黒鉛の除去を行い(図16(c))、黒鉛層の除去後、図16(d)に示すようにダイヤモンド表面溝加工部と鉄において再度接触加熱を行う。この黒鉛層の除去および接触加熱を繰返すことにより溝の深さ方向への加工を進展させる。

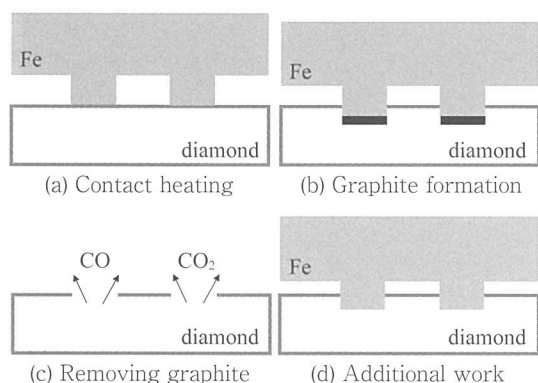


図16. Working process

(2) 繰返し加工プロセス実験

ダイヤモンドは6 mm角、厚さ1 mmの人工合成ダイヤモンドIB型を使用した。純鉄は、10 mm角、厚さ5 mmの試料上に幅300 μm、500 μm、突き出し高さ300 μmの溝形状を作製したものを使用した。プロセス実験には、卓上真空ガス置換炉(楸アドバンテック東洋製 FUA112DC)を使用し、真空中(真空度8.3 Pa)で加熱を行った。条件は接触加熱、黒鉛除去ともに加熱温度を900 °C、加熱保持時間4 h、繰返し4回とした。なお、冷却は炉冷にて行った。

7.3. 結果と考察

実験後のダイヤモンド表面を共焦点レーザ顕微鏡により測定した。繰返し加工における断面形状の変化を図17に、接触加熱の回数と加工深さの関係について図18に示す。また、1回目および4回目の溝幅300 μmの加工後の結果を図19に示す。加工は作製した溝部付近で起こり、加工を重ねるたびに加工深さは進展していくことがわかる。加工深さは、1回目の実験後には幅300 μmでは4.29 μm、幅500 μmでは1.78 μmであったが、

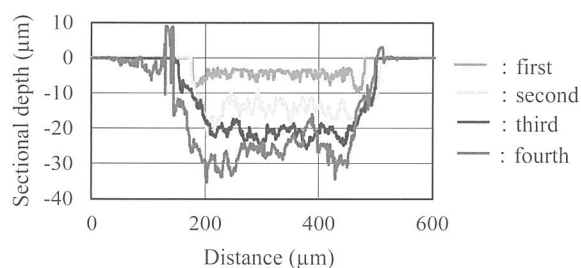


図17. Sectional shape of additional machined surface

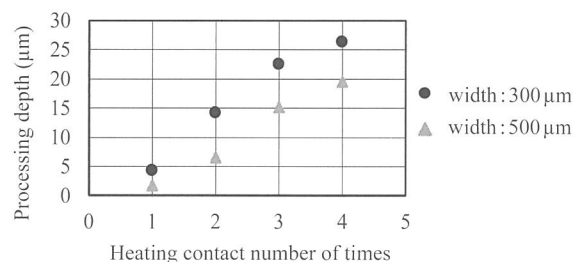


図18. Processing depth of machined surface

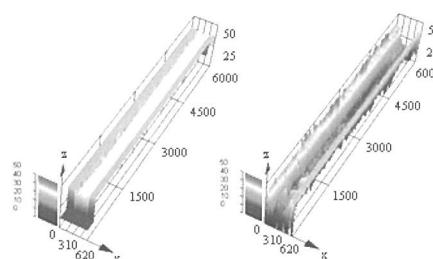


図19. Surface profile of additional machined surface

4回目終了時には幅300 μm、500 μmそれぞれで26.33 μm、19.48 μmの加工深さが得られた。また、1度に進展する加工深さについて、1回目の加工と比較して2、3回目の加工では約2倍の加工深さとなっている。

7.4. まとめ

真空中での純鉄との接触加熱による溝加工において、工程中にダイヤモンド表面に生成する黒鉛の除去工程を加えながら接触加熱を繰返すことにより、ダイヤモンド表面におよそ20 μmの深さの溝を形成することができた。今後は、形成面の表面特性の改善を目指していく。

8. 生体センシングチップ用半導体デバイスの低エネルギー化の検討

大村泰久*10

これまで、非侵襲的手法として知られているPhoto-plethysmogram (PPG) によるアルコール摂取検知センサーの基礎検討を進め、データに基づくアルゴリズムの提案を行い、一定の成果を収めた。他方で、被験者の汗などを化学分析する方法によってアルコール摂取検知を

*10 システム理工学部教授 工学博士

行うことを想定した無電源動作のMEMSセンサー用溶液攪拌装置の提案も行った。以上は、2017年度までの成果である。

今年度は、上記のこれまでの成果を更に現実的に進めるための検討を行った。まず、MEMSに応用する透明電極材料として想定しているZnO薄膜の物性制御に関する検討も行った。既に、2016年度に薄膜の抵抗を左右する伝導性のメカニズムとその制御方法に関して新しい知見を得ているが、2018年度は薄膜作成時の抵抗値評価における注意点について実験的に解析し、材料特性評価の方法における課題と問題を避けるための評価手法を提案した。

これらに加え、アルコール摂取検知センサーを将来的にはバッテリーレスで駆動させるため、超低エネルギー動作半導体の基礎研究も実施してきた。今年度は、今後どのような半導体をどのように使うべきかを明らかにするため、総合的な観点からの議論を著作としてまとめると共に、具体的な考察の例として、超低エネルギー動作する半導体の一つで現在議論されているトンネルFETのスイッチング動作性能の問題点を探った。集積回路化にとって好ましい横型トンネルFETの信号遅延時間に悪影響を与えているミラー容量の削減方法と、それによるスイッチング時間の改善効果を明らかにした。

9. レーザ加工法によるマイクロ微細構造の創成

新井泰彦*11

9.1. はじめに

一般に、走査電子顕微鏡（SEM）内で動力を発生させようとする場合に、電動モータのように電磁波を発生する動力源を用いると、SEMの電子が偏向され画像がひずむことがある。このことより、電磁波を生じない動力源が求められる。本研究では、SEMチャンバー内で微小構造の様々な動きを実現させるための動力源として、光放射圧を利用したMEMSモータの開発を目指している。本研究で開発するMEMSモータは図20に示すようにマイクロロータの周囲に光を照射するための光導

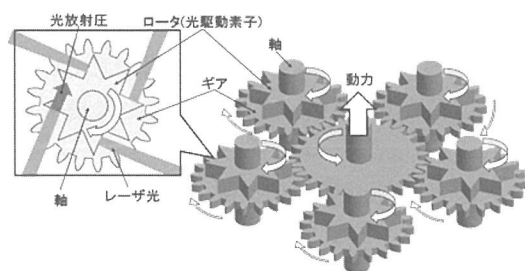


図20. マイクロモータの概念図

*11 システム理工学部教授 工学博士

波路を設置し、光放射圧により電磁波が生じない回転力発生装置である。さらに、このロータにより得られたトルクを歯車列によってより大きな動力として取り出す構造の開発を目指している。

本年度は、昨年度の成果に基づき、より高速回転が可能な光マイクロロータの設計・製作、並びにロータで発生したトルクを伝達させるための歯車列の製作を行った。

9.2. マイクロロータの製作

電気学会論文誌Eにおいて報告したロータの回転速度とロータ直径に関する成果に基づき、図21に示すような昨年度までの直径100μmからより半径の小さなロータを製作し、高速回転によるより大きな動力の取り出し機構を製作した。直径が70μmのマイクロロータをNanoscribe社製の3Dプリンタを用いて製作した。より安定した回転を得るために、2方向からの照射ではなく、3方向からの照射による回転ロータを設計・製作した。

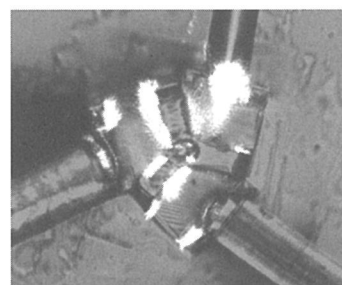


図21. 三方向から光放射され回転するロータ

昨年度の2方向からの実験結果では、レーザー光1本当たり26.5 mWにより得られる光放射圧から、ロータ先端で得られるトルクは3.58 fNmであることが分かった。本年度はより実用に近づけるために、図21に示す3方向からのレーザー光を照射する新たなロータを3Dプリンタで製作し、ロータが液体中で回転することを確認した。3方向からバランスよく力がかかることより、安定した回転が得られている。今後、より高いレーザーパワーにより、シミュレーション通りの回転を得ることを目指している。

9.3. 軸付きギアの開発

ロータの改善に伴い、より高速回転力から動力が得られることより、図20に示すような星形の歯車列の製作を本年度は進めた。昨年度から図22に示すような設計変更に伴い、ギアと軸の間にすき間が存在しない構造を目指すとともに、機械工学分野で長年にわたって研究がなされてきた通常の歯車での議論をマイクロ領域において発展させるギア列の開発を目指し、図23に示すような軸と一体化した歯車列を300μmの寸法で製作した。

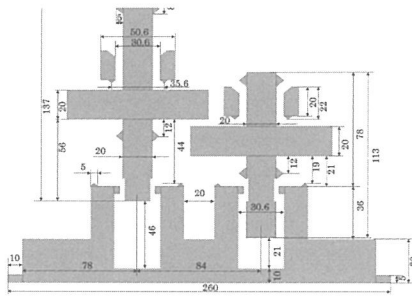


図22. 軸と一体化した歯車列

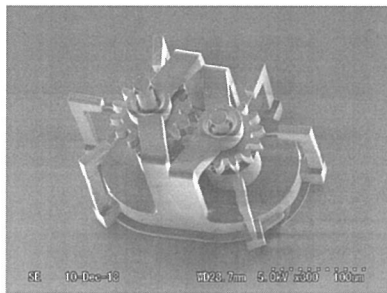


図23. 製作したギア列

さらに、図 24 に示すようなモーメントバランス法に基づき、より正確なマイクロギアの伝達効率を計測した。

製作したギアにおけるトルクの伝達特性を図 25 に示す装置を用いて実施し、作製した歯車列のトルクの伝達効率を測定した。マイクロ領域の歯車であっても、伝達効率は、90～95%程度得られることが分かった。新たな装置の開発に伴い、昨年までに比してより再現性のある精度の高い結果が得られている。



図24. モーメントバランス法のマイクロギアへの適用モデル

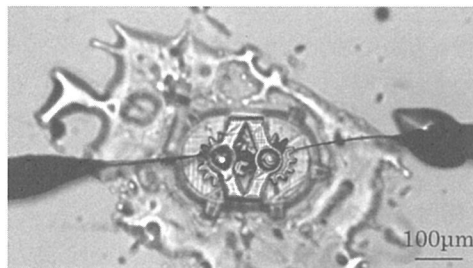


図25. 適用実験

9. 4. おわりに

本研究ではMEMSモータの開発を目指し、ロータの高速回転を目指した設計並びにその装置を製作した。さらに歯車列を製作し、マイクロ領域における伝達特性をモーメントバランス法を用いて明確にした。

10. 1. はじめに

金属や半導体を直径数ナノメートルのナノ粒子にすると、その電気的、光学的、磁気的特性が大きく変化することが知られている。これまで金ナノ粒子および金クラスター粒子の光学特性を利用したグルコースセンサーなどを報告してきたが、本年度はアルミニウム (Al) ナノ粒子、鉄ナノ粒子およびシリコンナノ粒子の磁気的特性を測定するとともに、ハイパーサーミア材料への応用の可能性を検討する研究を進めてきた。ここではそのAlナノ粒子について、その進捗を報告する。

10. 2. 実験内容と結果

金や白金などの貴金属ナノ粒子は自発的磁気モーメントを持ち、その集合体は超常磁性を示す。ナノ粒子が示すこのような磁気的性質はバイオメディカル材料への応用が期待されている。一方、我々のグループでは、パルスレーザーによる非平衡プロセスを用いて作成したAlナノ粒子が超常磁性を示すことを発見した¹¹⁾。その磁気モーメントの起源についてはサイズ効果 (表面効果) が有力であるが、十分には理解できていない。しかし、磁性Alナノ粒子が作成可能となれば、その応用範囲は極めて広く魅力的な材料といえる。本研究では、Alナノ粒子のハイパーサーミア療法への応用を目指して、まずはその基本的な交流磁化特性を調べることにした。

Alナノ粒子は、繰り返し周波数が 20 kHz のNd-YAG パルスレーザーを用いて、 α アルミナ粒子を純水中でアブレーションすることで作成した。本手法では、平均粒径が 19 nm のAlナノ粒子を作成することができた。X線回折測定から、Alナノ粒子は結晶性を有し、表面酸化はあるが大気中で安定であった。

図 26 は、Alナノ粒子とAgナノ粒子を混ぜた混合試料のM-H特性である。これから、Agナノ粒子のみでは磁化しないが、Alナノ粒子との混合試料は外部磁場に対して磁化が急激に立ち上がり、やがて飽和する「超常磁性」であることがわかる。また、その飽和磁化の値はAlナノ粒子の含有量が多くなるほど増加していることがわかる。つまり、Alナノ粒子は自発的な磁気モーメントを有した「磁性ナノ粒子」であることを示している。加えて、図 26 からは明瞭には確認できないが、低磁場領域を拡大すると、AlとAgが同程度含まれる試料では磁性ヒステリシス、つまり強磁性的振る舞いが見られた。このような磁性ナノ粒子を医療に応用する例として、

*12 システム理工学部教授 博士 (材料科学)

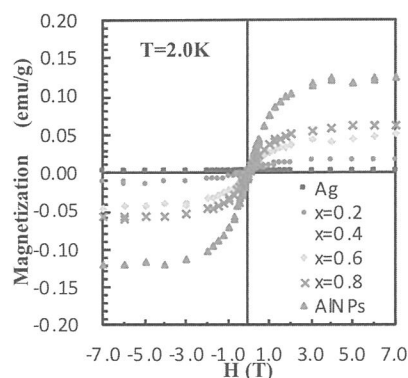


図26. Alナノ粒子およびAl-Ag複合試料の磁気特性

「ハイパーサーミア治療」が挙げられる。ハイパーサーミア治療は、患部に磁性粒子を配置して交流磁場を印加することで磁性粒子周囲のみを局所的に加熱してがん細胞などを死滅させる温熱療法である。

磁性体ナノ粒子に交流磁場を印加した際の発熱は、強磁性ナノ粒子については「ヒステリシス損」、超常磁性ナノ粒子については「磁気緩和」によるエネルギー損失によって起こる。磁気緩和によるエネルギー損失量は、交流磁化率の虚数部がパラメータの一つとなっている。つまり、その値が最大となる周波数で最も発熱量が大きくなる。そこで、超常磁性Alナノ粒子のハイパーサーミア材料としての適性調査の第一段として、Alナノ粒子の交流磁場応答特性について調べた。ただし、本年度は研究室の実験設備の制約もあり、Alナノ粒子の交流磁化率そのものではなく、Alナノ粒子を含むソレノイドコイルのインダクタンスからAlナノ粒子の交流磁場応答についての知見を得ることにした。

交流磁場応答特性は、Alナノ粒子を詰めた薬用ゼラチンカプセルにエナメル銅線 ($\phi 0.32$ mm) を巻き、直径5 mm、長さ10 mm、巻き数60回のコイルを作成し、そのインダクタンスの周波数依存性を計測した。また、比較のため空カプセルの試料も作成した。測定にはLCRメータ (HIOKI 3532-50) を使い、周波数のスキャン範囲は0.1 MHzから5.0 MHzとした。その結果を用いて、空カプセル (大気) に対するAlナノ粒子の比透磁率を求め考察した。

図27に測定結果を示す。図27のインセットは、コイルのインダクタンスの周波数依存性である。測定周波数の全域において、Alナノ粒子試料のインダクタンス L_{Al} は大気試料のインダクタンス L_{air} よりもわずかに小さくなっている。また、透磁率の実数部の比、 $\mu'_r = (\mu'_{Al} / \mu'_{air})$ および虚数部の比、 $\mu''_r = (\mu''_{Al} / \mu''_{air})$ の周波数依存性をプロットすると、 μ'_r は全周波数領域でほぼ1であるが、 μ''_r は1.2 MHzと2.1 MHz付近で最大値をとり、高周波数領域では $\mu''_r = 1$ に収束するような特性が得られた。 μ''_r

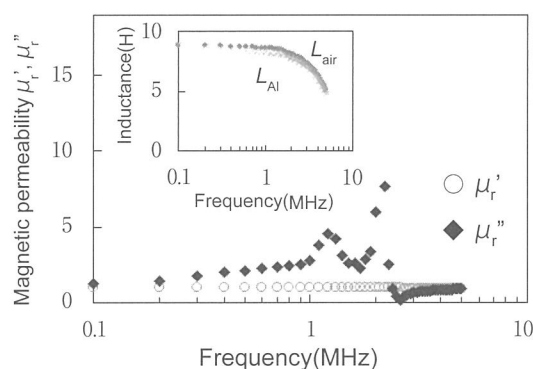


図27. Alナノ粒子コイルのインダクタンスおよび比透磁率の周波数依存性

はエネルギー損失に関係するため、ハイパーサーミアへの応用には1~2 MHzの周波数が最適だと考えられる。一方、高周波数領域において $\mu''_r = 1$ に収束したのは、磁気モーメントの応答が交流磁場に追従できなくなったためと考えられる。

10. 3. まとめ

今年度の実験では、上述のようにカプセルを含むコイルのインダクタンスから芯部の“有効透磁率”を算出し、Alナノ粒子の交流磁化率と関連づけたが、より詳細なAlナノ粒子の効果を考察するためには、ナノ粒子中およびナノ粒子間を流れる渦電流などを考慮する必要がある。また、現状では得られた比透磁率の値は小さく、高透磁率材料としてあまり魅力的ではないように思われるかもしれないが、現状で測定しているのは環境を含めた「見かけの透磁率」であることを注記したい。なぜなら、この「見かけの透磁率」は材料の磁化率 (帯磁率) そのものではなく、カプセル内のナノ粒子密度や試料形状などに大きく依存するからである。今後は上記の点に注意しながら、Alナノ粒子およびAlとAgナノ粒子の複合試料のintrinsicな交流磁場特性の詳細を調べるとともに、密度や形状依存性についても調査して応用に適した諸条件を探っていきたい。加えて、ジェル中にそれらナノ粒子を加えた擬似試料での発熱効果についても実験する予定である。

謝辞

本研究の一部は、「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (2018年度)」によって実施されたものである。

また、大腸菌の遺伝子組み換えや顕微鏡観察にご協力いただいた国立研究開発法人情報通信研究機構の佐川博士、小嶋博士にこの場を借りて御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 山田雅大ら, 2017年度精密工学会秋季大会 (2017).
- 2) 北田博之ら, 2017年度精密工学会秋季大会 (2017).
- 3) K. Autumn *et al.*, Proc. Natl. Acad. USA, 99(19), 12252-12256 (2002).
- 4) H. Jiang *et al.*, Sci Robt., 2(7), eaan4545 (2017).
- 5) H. Iwata *et al.*, IEEE Robotics and Automation Letters, 2 (2017).
- 6) E. P. Ivanova *et al.*, Small, 8, 2489-2494 (2012).
- 7) E. P. Ivanova *et al.*, Nature Communications, 3838, 1-7 (2013).
- 8) T. Tripathy *et al.*, Adv. Colloid Inter. Sci., 248, 85-104 (2017).
- 9) 伊藤健, 技苑, 144, 81-82 (2017).
- 10) 伊藤健, 技苑, 146, 72-73 (2018).
- 11) M. Inada *et al.*, J. Electrical and Electronic Engineering, 5, 98-103 (2017).

3次元ナノ・マイクロ構造の創成とバイオミメティクス・医療への応用

2018年度 研究成果一覧表

論文

- (1) 永田一志, 樊利文, 武田朋之, 服部佐知子, 青柳誠司, 鈴木昌人, 才木常正, 瀧澤由佳子, 安藤妙子, 杉山進, 高解像三次元プリンタによる超狭ピッチバンプアレイ用プローブ, エレクトロニクス実装学会誌, 21(6), 586-589 (2018).
- (2) T. Iseri, S. Shindo, Y. Miyachi, A. Hirate, T. Shimizu, T. Ito, S. Tanaka, S. Shingubara, Evaluation of the interdiffusion properties of Cu and electroless plated CoWB barrier films formed on silicon substrate, Japanese Journal of Applied Physics, 57, 07MB02 (2018).
- (3) N. Asai, T. Shimizu, S. Shingubara, T. Ito, Fabrication of highly sensitive QCM sensor using AAO nanoholes and its application in biosensing, Sensors and Actuators B: Chemical, 276, 534-539 (2018).
- (4) K. Nakade, K. Jindai, T. Sagawa, H. Kojima, T. Shimizu, S. Shingubara, T. Ito, Adhesion and bactericidal properties of a wettability-controlled artificial nanostructure, ACS Applied Nano Materials, 1, 5736-5741 (2018).
- (5) 伊藤健, セミの翅が持つナノ構造に起因する抗菌特性評価とその模倣, Fragrance Journal, 2018-6, 51-56 (2018).
- (6) T. Saiki, Y. Iida, M. Inada, Appearance of Ferromagnetic Property for Si Nanopolycrystalline Body and Vanishing of Electrical Resistances at Local High Frequencies, Journal of Nanomaterials, 2018, 9260280 (2018).
- (7) 佐伯拓, 飯田幸雄, 稲田貢, 焼成鉄ナノ多結晶体の磁気特性と高周波電気抵抗の局所的消失, 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌), 138(10), 512-520 (2018).
- (8) Y. Arai, Pre-treatment for preventing degradation of measurement accuracy from speckle noise in speckle interferometry, Measurement, 136, 36-41 (2019).
- (9) 佐野弘人, 新井泰彦, 3Dプリンタを用いた光放射圧に基づくMEMSモータの開発, 電気学会論文誌E (センサ・マイクロマシン部門誌), 138(9), 406-411 (2018).
- (10) Y. Arai, Three-dimensional shape measurement beyond the diffraction limit of lens using speckle interferometry, Journal of modern optics, 65(6), 1866-1874 (2018).
- (11) T. Takazawa, M. Tobe, M. Kimura, T. Suto, J. Ohta, H. Matsuoka, H. Yano, S. Saito, Physiological and Pharmaceutical Knowledge in "Ninja" Society: Suggestions for Modern Anesthesiologists and Intensivists, Journal of Anesthesia History, 4, 209-213 (2018).
- (12) T. Horiuchi, T. Takazawa, M. Orihara, S. Sakamoto, A. Yokohama, J. Takahashi, A. Tomioka, N. Yoshida, K. Hagiwara, S. Saito, Required cefazolin concentration to maximize diagnostic accuracy of the basophil activation test for cefazolin-induced anaphylaxis, Journal of Anesthesia, 32(6), 797-805 (2018).
- (13) K. Kubo, T. Takazawa, T. Sato, T. Horiuchi, S. Saito, Effects of lidocaine administration using a newly developed urethral catheter on catheter removal pain: A randomized clinical trial, Biomedical Research and Clinical Practice, 3(3), 1-4 (2018).
- (14) D. Uta, T. Hattori, K. I. Kasahara, M. Yoshimura, Effects of naftopidil in substantia gelatinosa neurons of the adult rat spinal dorsal horn, The Journal of Functional Diagnosis of the Spinal Cord, in press.
- (15) D. Uta, T. Hattori, M. Yoshimura, Effects of high concentrations of naftopidil on dorsal root-evoked excitatory synaptic transmissions in substantia gelatinosa neurons *in vitro*, International Neurology Journal, 22(4), 252-259 (2018).

図書

- (1) H. Takise, M. Suzuki, T. Takahashi, S. Aoyagi, Piezoelectric Vibration Energy Harvester Using PolyVinylidene Difluoride Film Formed by Bar-Coating Method and Its Spray-Coating Method on a Three Dimensional Surface, "Piezoelectricity—Organic and Inorganic Materials and Applications", IntecOpen, 83-101 (2018).

- (1) S. Yamamoto, M. Yamada, T. Takahashi, M. Suzuki, S. Aoyagi, R. Hosomi, K. Fukunaga, D. Uta, T. Takazawa, Observation of mosquito's labium and its application to microneedle, 17th International Conference on Precision Engineering, G-1-6, Kanagawa, Japan (2018).
- (2) S. Terashima, C. Tatsukawa, M. Suzuki, T. Takahashi, S. Aoyagi, Fundamental Study on Thermal Imprint of Microneedle Tip under Atmospheric Pressure, 17th International Conference on Precision Engineering, G-1-7, Kanagawa, Japan (2018).
- (3) S. Aoyagi, Skin Puncture and Blood Sampling Inspired by Mosquito Using A Microneedle Integrated with Buckling Prevention Jig, The 5th International Conference on Microneedles, Canada (2018).
- (4) S. Terashima, C. Tatsukawa, M. Suzuki, T. Takahashi, S. Aoyagi, Fabrication of Microneedles Tip by Thermal Nanoimprint Method, The 5th International Conference on Microneedles, #61, Canada (2018).
- (5) T. Ito, K. Nakade, K. Jindai, T. Sagawa, H. Kojima, T. Shimizu, S. Shingubara, Time-Lapse Imaging of Bactericidal Effect on Nanostructural Surface, SPIE Smart Structures + Nondestructive Evaluation 2019, 10965-21, USA (2019).
- (6) R. Niwa, T. Shimizu, T. Ito, S. Shingubara, Effect of additives for preparation of vertical holes in Si substrate using metal-assisted chemical etching, 31nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 16D-8-4, Hokkaido, Japan (2018).
- (7) N. Asai, T. Shimizu, S. Shingubara, T. Ito, Fabricating of highly sensitive QCM sensor with a nano-honeycomb structure and demonstration for biosensing, European Material Research Society Fall Meeting 2018, Poland (2018).
- (8) T. Iseri, S. Shindo, T. Shimizu, T. Ito, M. Matsumoto, S. Shingubara, Effect of W addition for Cu diffusion barrier property of electroless CoB films formed on SiO₂, 2018 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference, P01, Mie, Japan (2018).
- (9) Y. Jiang, S. Sato, Y. Omura, A. Mallik, Aspects and Reduction of Miller Capacitance of Lateral Tunnel FETs, The 2018 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, A-2, Kyoto, Japan (2018).
- (10) N. Takahashi, S. Sato, Y. Omura, T. Saitoh, Measuring impact of light on resistance of non-doped ZnO films, International conference on Advanced Nano Materials, 90, Portugal (2018).
- (11) R. Yonezawa, T. Saiki, A. Matsuo, T. Saitoh, M. Inada, Magnetic properties of Al nanoparticles and Al/Ag nanoparticles composites, Materials Research Society 2018 Fall Meeting & Exhibit, NM02.10.16, USA (2018).
- (12) M. Tsuji, Y. Arai, Observation of buckling phenomena using 3D-speckle interferometer, 17th International Conference on Precision Engineering, D-3-4, Kanagawa, Japan (2018).
- (13) Y. Arai, Three-dimensional shape measurement beyond diffraction limit for measurement of dynamic event, 19th International Symposium on Optomechatronic Technology, OM_1.1, Mexico (2018).
- (14) Y. Arai, Three-dimensional shape measurement beyond the diffraction limit of lens using speckle interferometry, Interferometry XIX SPIE International Conference, 10749-1, USA (2018).
- (15) D. Uta, K. Imoto, H. Furue, Firing pattern and morphological analysis of substantia gelatinosa neurons receiving TRPA1-expressing afferents in rat spinal dorsal horn, The 49th National Institute Physiological Sciences International Symposium, P28, Aichi, Japan (2018).
- (16) D. Uta, T. Andoh, Electrophysiological and behavioral analysis of a mouse model of atopic dermatitis, The 48th Annual Meeting of the Society for Neuroscience 2018, 388.11/V13, USA (2018).
- (17) D. Uta, T. Andoh, K. Imoto, H. Furue, Morphological characteristics of superficial spinal dorsal horn neurons receiving 5-HT-responsive afferents in the rat spinal cord, The 28th International Symposium of Itch, 6, Tokyo, Japan (2018).
- (18) D. Uta, T. Andoh, Y. Kuraishi, K. Imoto, H. Furue, A pruritogen 5-HT-induced itching on synaptic transmission in spinal superficial dorsal horn neurons—In vivo patch-clamp recording analyse—, 18th World Congress of Basic and Clinical Pharmacology, PO2-2-40, Kyoto, Japan (2018).

国内学会

- (1) 駒走仁哉, 酒井裕也, 青柳誠司, 鈴木昌人, 高橋智一, 細見亮太, 福永健治, 歌大介, 安東嗣修, 高澤知規, 引土知幸, 川尻由美, 中山幸治, 蚊の唾液成分が動物の反射行動に与える影響の検討, 痛み研究会2018, P2, 愛知 (2018).
- (2) 北田博之, 酒井裕也, 青柳誠司, 鈴木昌人, 高橋智一, 細見亮太, 福永健治, 歌大介, 安東嗣修, 高澤知規, 引土知幸, 川尻由美, 中山幸治, 電気生理学的解析法を用いた蚊の唾液成分による機械的痛み刺激に対する効果の検討, 痛み研究会2018, P4, 愛知 (2018).
- (3) 辻岡大祐, 鈴木昌人, 高橋智一, 青柳誠司, エレクトレットを用いた回転型発電機の開発—熱インプリント法を用いたエレクトレットパターン形成—, 第9回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 31am3-PN-135, 北海道 (2018).
- (4) 瀧瀬宏樹, 鈴木昌人, 高橋智一, 青柳誠司, フレキシブル発電素子への応用を想定したディップコーティングによるPEDOT 高分子導電性薄膜およびPVDF 高分子圧電薄膜の成膜, 第35回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 31am3-PS-105, 北海道 (2018).
- (5) 北田博之, 山本晴輝, 高橋智一, 鈴木昌人, 山本峻己, 青柳誠司, 細見亮太, 福永健治, 歌大介, 高澤知規, 引土知幸, 川尻由美, 中山幸治, 動物の皮膚を用いた蚊の穿刺および吸血行動の観察, 日本機械学会2018年度年次大会, J1510201, 大阪 (2018).
- (6) 奥田健人, 村上峻人, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 細見亮太, 福永健治, 高澤知規, 歌大介, 引土知幸, 川尻由美, 中山幸治, 有精卵内の血管とハイスピードカメラを用いた蚊の吸血メカニズムの解明, 日本機械学会2018年度年次大会, J1510202, 大阪 (2018).
- (7) 山本峻己, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 長嶋利夫, 功刀厚志, 非線形有限要素法解析による微細針の穿刺シミュレーション: 解析結果と穿刺実験結果の比較, 日本機械学会2018年度年次大会, J1510203, 大阪 (2018).
- (8) 山田雅大, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 細見亮太, 福永健治, 歌大介, 高澤知規, 座屈防止機構と皮膚の撓み防止機構を有するマイクロニードルの開発: 動物の皮膚を用いた性能評価, 日本機械学会2018年度年次大会, J1510204, 大阪 (2018).
- (9) 関月, 山本峻己, 秋本翔平, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 引土知幸, 川尻由美, 中山幸治, マイクロピッチ格子付き寒天の変形を用いた分布力センサの作製および蚊のバイオミメティクスへの応用, 日本機械学会2018年度年次大会, J1520101, 大阪 (2018).
- (10) 堀江一生, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 吸盤表面の微細構造が吸着力に与える影響, 日本機械学会2018年度年次大会, J1520102, 大阪 (2018).
- (11) 佐藤潤哉, 清水智弘, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, ヤモリを模倣した2段構造を持つ微細毛作製と吸着力の評価, 日本機械学会2018年度年次大会, J1520103, 大阪 (2018).
- (12) 瀧瀬宏樹, 鈴木昌人, 高橋智一, 青柳誠司, 高感度触覚センサへの適用を想定したマイクロ蛇腹ばねの作製と特性評価, 日本機械学会2018年度年次大会, J1520104, 大阪 (2018).
- (13) 寺嶋真伍, 立川周子, 鈴木昌人, 高橋智一, 青柳誠司, 大気圧中における熱インプリントを用いた円錐形状構造物の作製, 日本機械学会2018年度年次大会, J1520202, 大阪 (2018).
- (14) 辻岡大祐, 鈴木昌人, 高橋智一, 青柳誠司, 振動発電に用いる高性能エレクトレットの開発—エレクトレット表面へのテクスチャ付与の影響評価, 日本機械学会2018年度年次大会, J1520205, 大阪 (2018).
- (15) 山越健太郎, 鈴木昌人, 高橋智一, 青柳誠司, 吉川泰弘, 静電誘導・縦振動発電デバイスにおけるインピーダンス低減方法の検討, 日本機械学会2018年度年次大会, J1520206, 大阪 (2018).
- (16) 奥田健人, 鈴木昌人, 高橋智一, 青柳誠司, 西川秀樹, 二九良三, 血液が残留しない極細テーパ管の研磨法考案と開発, 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会, G01-4, 北海道 (2018).
- (17) 北田博之, 酒井裕也, 駒走仁哉, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 細見亮太, 福永健治, 歌大介, 高澤知規, 引土知幸, 川尻由美, 中山幸治, マウスの皮膚表面における蚊の穿刺時の下唇の観察, 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会, G01-5, 北海道 (2018).
- (18) 堀江一生, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, タコ模倣型吸着グリッパを搭載したロボットアームにおける水平搬送速度と物体落下頻度の関係, 第36回日本ロボット学会学術講演会, 1J3-08, 愛知 (2018).
- (19) 坂井大亮, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 繊維ジャミング吸着グリッパの吸着性能, 第36回日本ロボット学会学術講演会, 2K2-04, 愛知 (2018).

- (20) 福塚淳史, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, リング状ゴム袋を有するタコ模倣型吸着グリッパの開発, 第36回日本ロボット学会学術講演会, 2K2-06, 愛知 (2018).
- (21) 関月, 山本峻己, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 引土知幸, 川尻由美, 中山幸治, 生物の微小な力を計測するマイクロピッチ格子付き寒天を用いた分布力センサの開発, 精密工学会2018年度関西地方定期学術講演会, 47-J, 大阪 (2018).
- (22) 堀江一生, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, タコ模倣型グリッパを装着した産業用ロボットアームによる物体把持, ロボティクス・メカトロニクス講演会2018, 1A1-D06, 福岡 (2018).
- (23) 今井健太, 馳平一貴, 福塚淳史, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 柔軟物把持に適した水袋を有するタコ模倣型吸着グリッパの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会2018, 1A1-E01, 福岡 (2018).
- (24) 坂井大亮, 橋隼郎, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 吸引順序が剛性可変な真空吸着パッドの把持性能に与える影響, ロボティクス・メカトロニクス講演会2018, 1A1-E02, 福岡 (2018).
- (25) 佐藤潤哉, 清水智弘, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, ヤモリを模倣した吸着機構の光造形による作製と吸着力の測定, ロボティクス・メカトロニクス講演会2018, 2P1-E11, 福岡 (2018).
- (26) 関月, 山本峻己, 秋本翔平, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 引土知幸, 川尻由美, 中山幸治, 生物の微小な力を計測するマイクロピッチ格子付き寒天を用いた分布力センサの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会2018, 2P1-F12, 福岡 (2018).
- (27) 青柳誠司, 酒井裕也, 駒走仁哉, 北田博之, 高橋智一, 鈴木昌人, 細見亮太, 福永健治, 歌大介, 高澤知規, 引土知幸, 川尻由美, 中山幸治, 蚊の唾液成分が動物神経の活動に与える影響の検討—マウスの心臓を用いた予備的実験—, 第70回日本衛生動物学会, A211, 北海道 (2018).
- (28) 深堂秀亮, 井芹崇樹, 清水智弘, 伊藤健, 新宮原正三, 様々な添加剤を用いた微細溝パターンへの無電解めっき, Advanced Metallization Conference: Satellite Workshop, P-4, 東京 (2018).
- (29) 井芹崇樹, 深堂秀亮, 清水智弘, 伊藤健, 新宮原正三, SiO₂上に形成した無電解CoB膜のCu拡散バリア性に及ぼすW添加の効果, Advanced Metallization Conference: Satellite Workshop, P-6, 東京 (2018).
- (30) 丹羽良輔, 花谷俊輔, 山口嵩人, 清水智弘, 伊藤健, 新宮原正三, 貴金属触媒を用いた湿式Si-TSVエッチングにおける添加剤の効果, 第28回マイクロエレクトロニクスシンポジウム, 1C1-4, 大阪 (2018).
- (31) 中出一輝, 神代啓輔, 佐川貴志, 小嶋寛明, 清水智弘, 新宮原正三, 伊藤健, ナノ構造が発現する抗菌作用に付着力が及ぼす影響, 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-PA3-4, 愛知 (2018).
- (32) 増田恭介, 中出一輝, 神代啓輔, 小嶋寛明, 山下一郎, 清水智弘, 新宮原正三, 伊藤健, 電気化学インピーダンス法を用いたナノ構造電極上での抗菌メカニズム推定, 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-PA3-5, 愛知 (2018).
- (33) 佐伯拓, 宮楠大輝, 山崎和仁, 飯田幸雄, 稲田貢, 焼成鉄ナノ多結晶体における高周波抵抗の局所的消失, 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-PB1-14, 愛知 (2018).
- (34) 新井泰彦, 横関俊介, スペックル干渉計測技術を用いた光波位相検出による微細構造の三次元形状計測法, 精密工学会2019年度春季大会, L06, 東京 (2019).
- (35) 新井泰彦, スペックル干渉計測法を用いたレンズの回折限界を超えた三次元形状計測法, 光計測シンポジウム2018, 7, 東京 (2018).
- (36) 新井泰彦, 横関俊介, 回折限界を超えた三次元形状の動的現象を解析するためのスペックル干渉計測法, 精密工学会2018年度秋季大会学術講演会, D01-14, 北海道 (2018).
- (37) 大前快人, 辻雅樹, 新井泰彦, 電子スペックルに基づく三次元微細構造の観察, 精密工学会2018年度秋季大会学術講演会, D01-15, 北海道 (2018).
- (38) 歌大介, 坪島功幸, 田口徹, 線維筋痛症モデルラット脊髄後角細胞における侵害情報伝達の電気生理学的解析, 痛み研究会2018, P11, 愛知 (2018).
- (39) 歌大介, 末梢から脊髄後角への痒み情報伝達経路—*In vivo*パッチクランプ記録法を用いた解析—, 環境医学研究所第4回学術シンポジウム, 東京 (2018).
- (40) 歌大介, *In vivo*パッチクランプ法を用いた脊髄後角への痒みシナプス伝達の解析, 第38回鎮痛薬・オピオイドペプチドシンポジウム, 兵庫 (2018).
- (41) D. Uta, K. Tsuboshima, T. Andoh, T. Nishijo, K. Mizumura, T. Taguchi, *In vivo* patch clamp analysis of nociceptive synaptic transmission of spinal dorsal horn neurons in a rat model of fibromyalgia, 第40回日本疼痛学会, C2, 長崎 (2018).

その他

・研究発表

- (1) 山本峻己, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 長嶋利夫, 功刀厚志, 非線形有限要素法解析による微細針の穿刺シミュレーション—解析結果と穿刺実験結果の比較—, 第23回関西大学先端科学技術シンポジウム, ポスターNo.4, 大阪 (2019).
- (2) 山田雅大, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 細見亮太, 福永健治, 歌大介, 高澤知規, ねじりを用いた新しい採血方法の提案, 第23回関西大学先端科学技術シンポジウム, ポスターNo.5, 大阪 (2019).
- (3) 北田博之, 酒井裕也, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 細見亮太, 福永健治, 歌大介, 高澤知規, 引土知幸, 川尻由美, 中山幸治, 皮膚表面における蚊の穿刺時の下唇の観察, 第23回関西大学先端科学技術シンポジウム, ポスターNo.6, 大阪 (2019).
- (4) 奥田健人, 鈴木昌人, 高橋智一, 青柳誠司, 西川秀樹, 二九良三, 極細テーパ管の研磨法考案と開発, 第23回関西大学先端科学技術シンポジウム, ポスターNo.7, 大阪 (2019).
- (5) 佐藤潤哉, 清水智弘, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, ヤモリを模倣した吸着機構の作製と吸着力を測定, 第23回関西大学先端科学技術シンポジウム, ポスターNo.8, 大阪 (2019).
- (6) 関月, 山本峻己, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, 引土知幸, 川尻由美, 中山幸治, 生物の微小な力を計測する格子付き寒天を用いた分布力センサの開発, 第23回関西大学先端科学技術シンポジウム, ポスターNo.9, 大阪 (2019).
- (7) 瀧瀬宏樹, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, ディップコーティング法による薄膜形成とフレキシブル発電素子への応用, 第23回関西大学先端科学技術シンポジウム, ポスターNo.10, 大阪 (2019).
- (8) 寺嶋真伍, 立川周子, 高橋智一, 鈴木昌人, 青柳誠司, ナノインプリントによるマイクロニードルの作製, 第23回関西大学先端科学技術シンポジウム, ポスターNo.11, 大阪 (2019).
- (9) 大西優希, 辻岡大祐, 大川原琢志, 鈴木昌人, 高橋智一, 青柳誠司, エレクトレットを用いた回転発電機の開発—熱インプリント法を用いたエレクトレットパターン形成—, 第23回関西大学先端科学技術シンポジウム, ポスターNo.12, 大阪 (2019).
- (10) 山口智実, 大谷直輝, 純鉄への炭素拡散を利用した単結晶ダイヤモンドへの溝パターンプロセスの改善, 第23回関西大学先端科学技術シンポジウム, ポスターNo.19, 大阪 (2019).
- (11) 青柳誠司, 蚊のバイオミメティクスによる微量採血デバイスの開発, 医工学連携ワークショップ, 兵庫 (2018).
- (12) 青柳誠司, 蚊のバイオミメティクスによる低侵襲マイクロニードルの開発, 2018医理工連携研究部門シンポジウム, 千葉 (2018).
- (13) Y. Omura, Study on Alcohol-Intake Detection Sensor by Photoplethysmogram Signal Analysis, 3次元ナノ・マイクロ構造の創成とバイオミメティクス・医療への応用国際シンポジウム, 大阪 (2018).
- (14) M. Inada, Application of metal nanoclusters to biomedical materials, 3次元ナノ・マイクロ構造の創成とバイオミメティクス・医療への応用国際シンポジウム, 大阪 (2018).
- (15) T. Ito, Biosensing devices using nanostructures, 3次元ナノ・マイクロ構造の創成とバイオミメティクス・医療への応用国際シンポジウム, 大阪 (2018).

・特許

- (1) S. Aoyagi, H. Matsumoto, Capillary Blood Collection Device (毛細血管血採取装置), 出願番号: PCT/JP2018/020094 (2018).
- (2) 青柳誠司, 松本一, 穿刺針、穿刺装置および採血装置, 出願番号: 特願2018-193782 (2018).
- (3) 青柳誠司, 松本一, 駆動機構および穿孔装置, 出願番号: 特願2018-193783 (2018).

・資料提供

- (1) 企画展「危険生物」, マイクロニードル関連資料一式提供, 伊丹市昆虫館, 兵庫 (2018).

・展示

- (2) 青柳誠司, 往復回転穿刺による無痛採血システム (蚊のバイオミメティクス), イノベーション・ジャパン2018～大学見本市&ビジネスマッチング～, 東京 (2018).

・その他

- (1) (9)新種昆虫を発見せよ!, カの口をヒントに世界一痛くない注射針開発, PHP研究所, 148 (2018).
- (2) 3Dと動画で観察! 生き物のナゾ大解明BOOK, 「カのはりってどんなしくみ?」, 進研ゼミ小学講座 5年生教材, 8月号,

8 (2018).

- (3) 研究内容紹介パンフレット配布, 「らせんばね」「中空マイクロニードル」「オームばね」「細径針による毛細血管からの採血 (蚊のバイオミメティクス)」「3次元ナノ・マイクロ加工装置群」ファインケミカルジャパン2018, 東京 (2018).
- (4) 新井泰彦, スペクル干渉計測技術を用いた微細構造物の三次元計測, 機械の研究, 70(11), 900-904 (2018).