

令和 4 年 10 月 24 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03547

研究課題名(和文) 体外受精卵の成長をモニタリングするリング型マルチ卵重計の創製

研究課題名(英文) Development of ring-type multi-sensor for embryo growth monitoring

研究代表者

曾根 逸人 (Sone, Hayato)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：80344927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、受精卵から胚になるまでの成長を非侵襲かつ高精度に定量評価するための、受精卵を固定できるリング型センサを作製して、受精卵の質量と排出されるイオン検出による呼吸活性のマルチモニタリングの実現を目的とした。重ねフォトリソグラフィによるリング型センサの作製、センサ変位と表面電位の同時検出システムの構築を行い、マウス受精卵の質量と呼吸活性の同時測定を実施した。また、沈降測定法によるマウス受精卵質量測定も実施して、未受精卵467 ngから拡張胚盤胞784 ngまでの質量変化が測定できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本の年間出生数は1973年以降減少の一途をたどり、昨年の2021年は約81万人まで減少している。一方、35歳以上の高齢出産の割合が増加して、不妊症治療の利用件数も年々増加している。不妊症治療では体外受精-胚移植を実施する際の良好胚選択が着床および出産成功のための重要な要因となっている。しかし、現在のヒト胚の品質評価は、医師および胚培養士による形態評価が一般的のため、体外受精後の出産率は15～20%と低確率である。良好胚選別のための定量的評価法は2件しか報告がないため、本研究で受精卵質量と呼吸活性の同時測定の可能性が見出せたことは、新規定量評価法の開発に繋がる成果と考えている。

研究成果の概要(英文)：In this research, to evaluate the growth of fertilized egg from fertilization to embryo stage with a non-invasive and highly quantitative accuracy, a novel ring-shaped sensor was developed that can fix a fertilized egg, measuring the mass change and the ions released from the fertilized egg during the growth activity. The ring-shaped sensor was fabricated by overlay photolithography processes and the measurement system for detecting displacement and the surface potential of the ring-sensor simultaneously was developed. And then, the measurement of the mass change and respiratory activity of mouse fertilized eggs were performed. In addition, to verify the measured results of the ring-sensor, a sedimentation measurement method was employed for measuring the mass of mouse fertilized eggs, and as a result, the mass of unfertilized eggs with growth to the expanded blast stage was measured which was changed from 467 ng to 784 ng.

研究分野：ナノスケール計測加工

キーワード：カンチレバ - 半導体複合型バイオセンサ 検査・診断システム 医用システム 電子デバイス・機器
モニタリング

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

日本の年間出生数は209万人が誕生した1973年以降減少の一途をたどり、昨年は少し増加したものの約108万人(申請時の2017年時点の統計データ。2021年は約81万人まで減少)に留まっている。厚生労働省の統計によると、2005年から2015年の10年間で母親の出産年齢は29歳以下の割合が減少して、35歳以上の高齢出産の割合が約2倍に増加した。それに伴い、不妊症治療における生殖補助医療技術(Assisted Reproductive Technology; ART)の利用件数が年々増加している。ARTでは体外受精-胚移植を実施する際の良い胚選択が着床および出産成功のための重要な要因となっている。しかし、現在のヒト胚の品質評価は、医師および胚培養士による形態評価が一般的なため、体外受精後の出産率は15~20%と低確率である。良好胚選別のための定量的評価法は2件^{1,2)}しか報告がないため、体外受精卵からヒト胚になるまでの成長を非侵襲かつ高精度に定量評価する新規計測法の開発が研究課題の核心であり、日本社会にとって急務の課題である。

2. 研究の目的

本研究では、受精卵から胚になるまでの成長を非侵襲かつ高精度に定量評価するための、受精卵を固定できるリング型センサを作製して、変位および共振周波数検出による受精卵の質量モニタリングシステムを研究開発する。また、リング型センサは受精卵の外周に配置されることから、その内部に半導体センサを埋め込むことで受精卵から排出されるイオン濃度を同時検出して、質量変化と呼吸活性のマルチモニタリングの実現を目的とする。

3. 研究の方法

受精卵の質量と呼吸活性のマルチモニタリングを可能にするために、まずリング型センサを作製してから、それを用いて質量およびイオン濃度を測定するための測定システムを研究開発した。そして、開発したシステムを用いて溶液中でのセンサ動作確認を行った後に、受精卵を搭載して質量およびイオン濃度の同時測定を目指した。さらに、受精卵の成長段階ごとの質量確認を目的とした沈降測定法の開発と測定も実施した。これらを達成する方法として、以下の内容について研究を推進した。

- (1) リング型マルチセンサの形状設計とプロセス設計
- (2) 重ねフォトリソグラフィによるリング型マルチセンサの作製
- (3) センサ変位検出法の開発とポリスチレンビーズ質量測定
- (4) リング型センサによるウニ受精卵呼吸活性測定
- (5) 沈降測定法の開発とマウス受精卵質量測定
- (6) リング型マルチセンサを用いた受精卵の質量と呼吸活性の同時計測

4. 研究成果

- (1) リング型マルチセンサの形状設計とプロセス設計

リング型マルチセンサは、図1に示すようにSilicon on insulator (SOI) 基板のデバイス層に内径90 μm のドーナツ状のリングを形成し、4方向からの梁および片持ち梁で支持するリング型センサを基本形状とした。リングの内周表面にPドーピングによるn型半導体センサを形成して、対向する電極に配線した。もう一方の対向する梁にはピエゾ抵抗を埋め込み、受精卵搭載時のリングの変位で生じる抵抗変化をブリッジ回路、増幅回路、フィルタで構成する検出回路で測定した。梁の接合部にひずみが集中して曲がりやすいため、スリットを入れるネッキングを施した。図2に示すように、この梁1本の長さ L とネッキング部の幅 W をパラメータとして、リング型センサの共振周波数および受精卵(直径100 μm , 質量400ng)が搭載された場合に想定される垂直方向の応力3.9nNを印加した場合の垂直方向の変位を有限要素解析ソフト(COMSOL Multiphysics)を用いてシミュレーションした。センサ変位のシミュレーション結果の一例($L=150\mu\text{m}$, $W=8\mu\text{m}$)を図3に示す。受精卵に相当する荷重がリング部にかかるると垂直下向きに

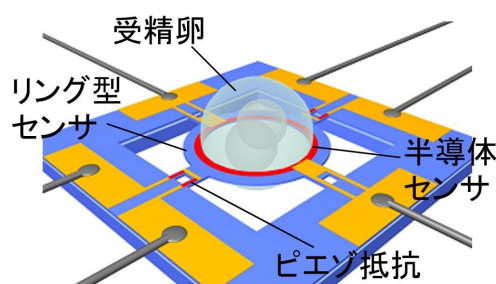


図1 リング型マルチセンサの模式図

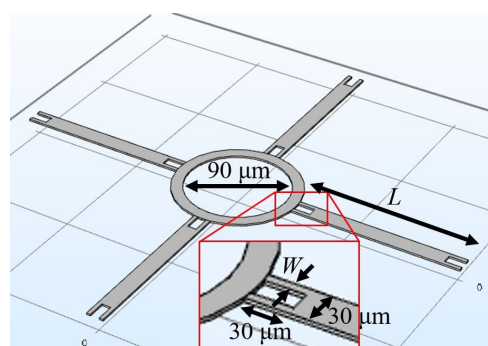


図2 リング型センサの設計例

変位することがわかる。図4は L (100~500 μm)と W (8, 12 μm)を変化させた場合の共振周波数と変位のシミュレーション結果である。 L の増加に伴って共振周波数は減少し、変位量は増加する傾向がみられる。 W が増加すると共振周波数は増加し、変位量は減少する傾向が見られるが、その変化はそれほど大きくないことがわかる。リング型センサを振動させて周波数変化から質量測定する場合には、共振周波数が高い方が高感度化され、振動させずに変位量を測定する場合には、変位が大きい方が高感度化されると予想した。そこで、 $L=100\sim 500\ \mu\text{m}$ 、 $W=8, 12\ \mu\text{m}$ をパラメータとして4方向梁16種類を作製することとした。

(2) 重ねフォトリソグラフィによるリング型マルチセンサの作製

リング型センサはp型のSOI基板に対して、

(1)絶縁層形成、(2)リングセンサ形成とドーパ部表面絶縁層エッチング、(3)Pドーピング、(4)電極形成、(5)絶縁保護層(SU-8)形成、(6)裏面深堀エッチングおよび犠牲層エッチングの作業工程による多重の重ねフォトリソグラフィで作製した。必要となる5層分のフォトマスクは、東京大学の共同利用設備の電子線描画装置(F5112, ADVANTEST)で作製した。位置合わせ精度 $<2\ \mu\text{m}$ を目標に作業を進めたが、センサ完成までに裏面アライメントを含む5回の重ねフォトリソグラフィが必要のため、位置ずれ許容範囲を修正したフォトマスクを複数回作製し直した。また、各工程では電気炉、反応性イオンエッチング装置(RIE)、高周波スパッタリング装置などの各種パラメータを調整して、加工条件を最適化しながら作業したので、多大な時間と労力を要した。

図5に作製したリング型センサ基板の外観を示す。20 mm角のSOI基板上に 4×4 に配置されたセンサが形成されていて、各センサの暗くなっている四角形の部分にリングセンサがある。そして、各センサの四方に向けてTiによる配線が施されているのが確認できる。図6は $L=200\ \mu\text{m}$ 、 $W=12\ \mu\text{m}$ のリング型センサのリング部を拡大した顕微鏡像である。中央に四方から梁で支持されているリングがあり、リング内側と梁の周囲は同じ色に見えることから、エッチングで抜けている(穴が開いている)ことがわかる。それ以外の部分には Si_3N_4 が薄く成膜されているが、暗く見えている部分はSi、明るい黄色く見えている部分はTi配線である。リング表面はSiと異なって白く見えているが、これはPドーピングによって半導体センサが形成されたことを示唆している。この半導体センサに対して上下方向の梁を通して配線が施されていて、横方向の梁の根元にはネッキング部分にPドーピングによるピエゾ抵抗が形成されて横方向に配線されていることが確認できる。他のセンサについても、同様に顕微鏡観察して設計通りの形状に加工できていることを確認した。

(3) センサ変位検出法の開発とポリスチレンビーズ質量測定

リング型センサに試料を搭載した際のリング部の垂直方向の変位を測定するため、図7に示す交流ブリッジ回路を用いた変位測定システムを作製した。リングを指示する梁の根元に埋設されたピエゾ抵抗とセンサの非可動部に埋設された温度補償用の抵抗および外部に置いた抵抗を接続してブリッジ回路を構成し、交流信号を印加して対角からの出力信号をひずみ測定器で増幅とフィルタリングしてからデータ集録システムを通してPCへ入力した。PC上では、計測制

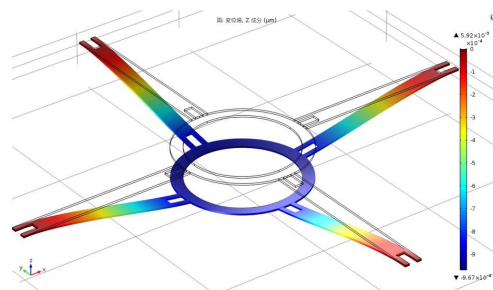


図3 リング型センサのシミュレーション結果例

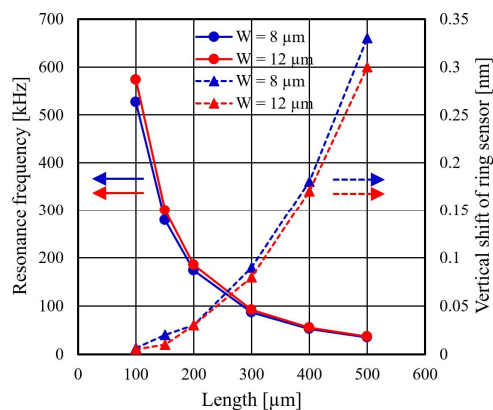


図4 リング型センサの共振周波数と垂直方向変位の梁長さ依存性計算結果

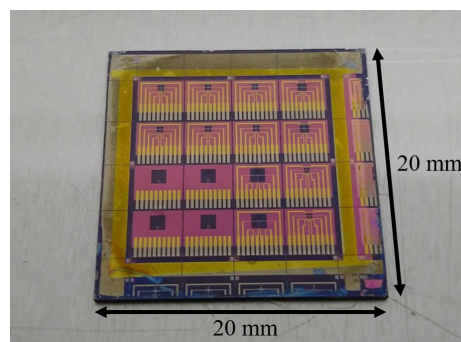


図5 リング型センサ基板の外観

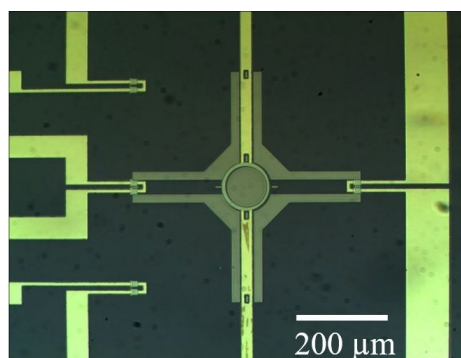


図6 リング型センサの一例
($L=200\ \mu\text{m}$ 、 $W=12\ \mu\text{m}$)

御ソフトウェアのLabVIEWを用いて出力信号の周波数、位相を測定すると共に、入力信号を参照して2位相ロックインアンプの信号処理を行って、振幅を測定した。ここで測定される振幅変化量はリングの変位量に比例し、変位量とリングに搭載した試料の質量は比例することから、振幅を測定することで搭載した試料の質量が測定できるようになった。

リング型センサ ($L=500 \mu\text{m}$, $W=12 \mu\text{m}$) にポリスチレンビーズ (PSB, 質量約 440 ng) 1 つを搭載した時の振幅測定結果を図 8 に示す。搭載前後で 30 mV の振幅増加が測定され、検出感度は 14.7 ng/mV と求まった。

(4) リング型センサによるウニ受精卵呼吸活性測定

リング内周表面に形成された半導体センサには、図 9 に示すようにソースメータを接続し、溶液中に設置した塩化銀の参照電極を基準として、センサ表面の電位を測定した。人工海水中でセンサリング部にウニ卵子を搭載した後に受精させ、32 細胞になるまでの表面電位を測定したところ、図 10 の結果が得られた。挿入図は測定中の受精卵の光学顕微鏡像で、時間経過に伴って細胞分裂が進んだことが確認できる。表面電位は海水の動きなどの外乱による変動は見られるが、受精後から成長に伴って上昇して、32 細胞期までに約 17 mV の上昇が得られた。事前に測定したセンサの pH 感度 23.5 mV/pH から、呼吸活性による pH 変化は約 pH0.7 と見積もられた。これは坂田らがバイオトランジスタを用いて測定した先行研究²⁾と類似しており、受精卵の呼吸活性が測定できたものと考えている。

(5) 沈降測定法の開発とマウス受精卵質量測定

受精卵の質量を測定した報告がないことから、沈降測定法による測定システムを開発した。図 11 のように垂直に立てた内径 6 mm のガラス管内に培養溶液 (D-PBS+5%CS) を満たし、測定物を含む溶液を管上部から滴下して終端速度に達した状態を管側に 90° に配置した 2 台の CCD カメラで録画した。管の内壁近くは沈降速度が遅いため、2 台の画像を比較して管の中央を通過した測定物の沈降速度を測定し、次のストークスの式から密度を算出した。

$$\rho_p = \frac{18v_s\eta}{D_p^2g} + \rho_f \quad (1)$$

ここで ρ_p は測定物の密度、 v_s は沈降速度、 η は溶液の粘度、 D_p は測定物の直径、 g は重力加速度、 ρ_f は溶液の密度である。

このシステムを用いて、マウス受精卵の未受精卵から拡張胚盤胞 (expanded-blast) までの測定を行った。沈降測定させる前に、光学顕微鏡を用いて受精卵の直径を測定して、各成長段階の平均直径を求めた。平均直径は未受精卵が 95.5 μm ($=4.1$)、拡張胚盤胞が 113.6 μm ($=7.3$) であった。次に、各成長段階の受精卵を 1 個ずつ沈降させて各 10 個以上の沈降速度を測定した。図 12 は測定結果の一例で、2 細胞期 (2cell) の受精卵の沈降測定動画を 10 秒間隔でスナップショットして合成した画像である。左右の画像が 2 台のカメラで撮影した画像で、赤丸内に受精卵が写って

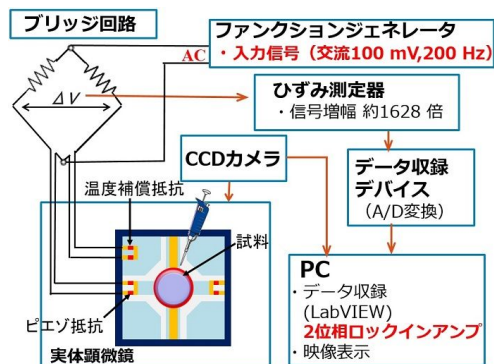


図 7 変位測定システム模式図

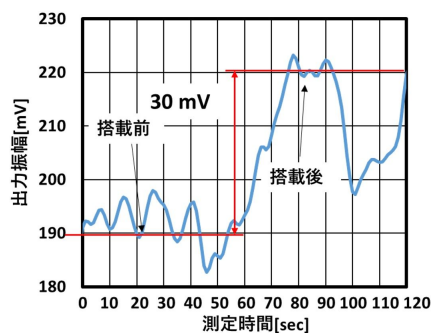


図 8 PSB 搭載時の振幅測定結果

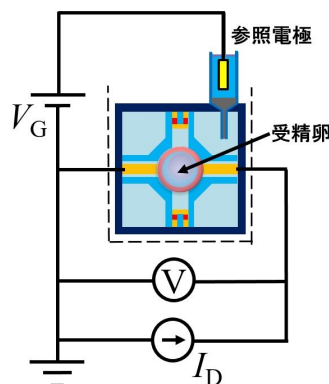


図 9 表面電位測定システム模式図

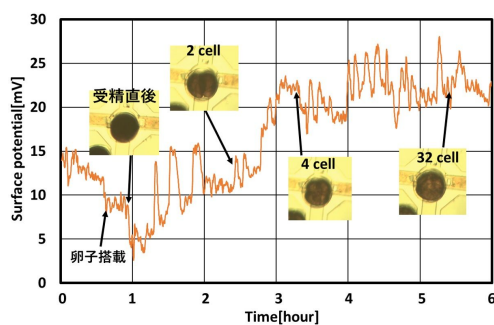


図 10 ウニ受精卵搭載表面電位測定結果

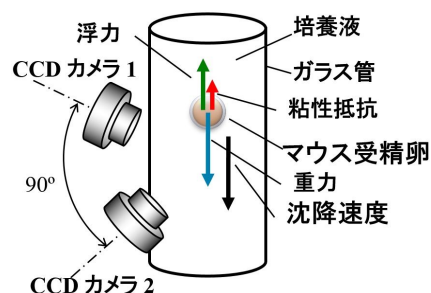


図 11 2 方向観察沈降測定システム概略

いて、ガラス管の中央部分を沈降している1つの受精卵を撮影できている。この画像から沈降速度を計算して平均した2cellの沈降速度は108.3 $\mu\text{m/s}$ であった。この平均沈降速度、事前にピクノメータを用いて測定した溶液密度、ウベローデ型毛細管粘度計を用いて測定した粘度を(1)式に代入して密度を計算した。その結果、受精後から胚盤胞(blast)まで密度が増加する傾向が見られた。そして、質量を求めたところ、未受精卵の467 ngからblastの519 ngまで緩やかに増加して、その後拡張胚盤胞(expanded-blast)の784 ngまで急激に増加することがわかった。blast以降に質量は大きく増加していることから、培養液から栄養を吸収しながら継続的に成長していることを示唆していると考えられる。

(6) リング型マルチセンサを用いた受精卵の質量と呼吸活性の同時計測

(3)でデータ集録システムとLabVIEWソフトを用いて構築した変位測定システムと、(4)でソースメータを用いて構築した表面電位測定システムを組み合わせると同時測定システムを開発した。培養溶液中にリング型センサ($L=500\ \mu\text{m}$, $\phi=12\ \mu\text{m}$)を設置して、マウス受精卵をリング部に搭載して質量と呼吸活性を同時測定した。最初に1cellの受精卵を搭載したところ、質量測定では、図13のようにセンサの出力は約0.15 mVであった。また、2cell受精卵を搭載したところ、出力は約0.5 mVが得られた。いずれもノイズが大きく、センサの変位出力と搭載質量の対応が未校正のため質量は見積もれていないが、受精卵成長に伴う質量増加傾向は得られた。

同時に表面電位測定では、図14のように1cell受精卵をセンサに搭載後、約13分間で10 mVの電位上昇が得られた。事前にpH標準液を用いて測定したpH感度13.5 mV/pHから、呼吸活性に伴うpH変化は約0.7 pHと見積もることができた。13分間では2cellへの細胞分裂に至らず1cellのみであり、成長は僅かであったので、得られたpH変化量は実際よりも大きいように思われる。

以上の結果から育成期間中の連続測定には至らなかったが、マウス受精卵の質量と呼吸活性の同時測定の可能性は確認できた。今後も研究を継続して、再現性を確認しながら同時連続測定を目指す予定である。

<引用文献>

- 1) Y. Murayama, J. Mizuno, H. Kamakura, Y. Fueta, H. Nakamura, K. Akaishi, K. Anzai, A. Watanabe, H. Inui, and S. Omata, *Human Cell*, **19** (2006) 119.
- 2) T. Sakata, I. Makino, and S. Kita, *Eur. Biophys. J.*, **40** (2011) 699.

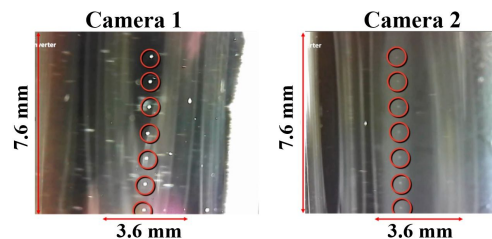


図12 マウス受精卵(2cell)の沈降動画の10秒間隔スナップショット画像

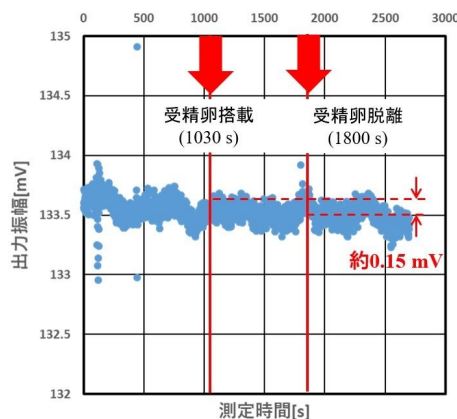


図13 リング型センサを用いたマウス受精卵(1cell)質量測定結果

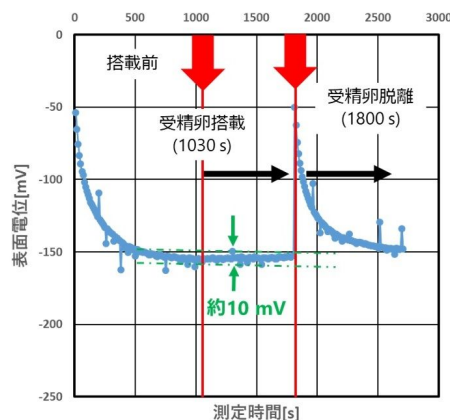


図14 リング型センサを用いたマウス受精卵(1cell)表面電位測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sone Hayato, Kawakami Tomoyuki, Saito Akiko, Sayama Yuki, Hosaka Sumio, Sakata Toshiya	4. 巻 30
2. 論文標題 Fabrication of Holder-type Piezoresistive Cantilever for Embryo Mass Measurement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 2369 ~ 2369
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18494/SAM.2018.1951	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 -
1. 著者名 Tomoya Tashiro, Zhang Hui, Oshima Kakeru, Sakurai Yuya, Suzuki Takaaki, Ohshima Noriyasu, Izumi Takashi, Sone Hayato	4. 巻 790
2. 論文標題 Fabrication of N-Type Silicon Nanowire Biosensor for Sub-10-Femtomolar Concentration of Immunoglobulin	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 28 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.790.28	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Zhang Hui, Kikuchi Naoki, Ohshima Noriyasu, Kajisa Taira, Sakata Toshiya, Izumi Takashi, Sone Hayato	4. 巻 12
2. 論文標題 Design and Fabrication of Silicon Nanowire-Based Biosensors with Integration of Critical Factors: Toward Ultrasensitive Specific Detection of Biomolecules	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 51808 ~ 51819
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c13984	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Hosaka Sumio, Takashi Akahane, Kazumasa Ohyama, Zhang Hui, Yin You, Sone Hayato	4. 巻 3
2. 論文標題 Formation of 7-nm-wide Line&Spaces in Half Pitch by 3 Dimensional Self-assembly of Nanodots Using Sphere Type PS-PDMS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 84 ~ 90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24018/ejphysics.2021.3.6.141	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hui Zhang, Kei Okabe, Naoki Kikuchi, Noriyasu Ohshima, Taira Kajisa, Toshiya Sakata, Takashi Izumi and Hayato Sone
2. 発表標題 Fabrication of Ultrahigh-Sensitivity Silicon Nanowire Biosensor by CMOS-Compatible Process for Detecting Biomolecules at Low Concentrations
3. 学会等名 International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 曾根逸人
2. 発表標題 ナノ加工技術を用いた高感度バイオセンサの創製
3. 学会等名 スマートプロセス学会 第5回有機/無機接合研究委員会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊池直樹, 吉川朝哉, 齋藤暁子, 佐々木直哉, 外山吉治, 張慧, 保坂純男, 坂田利弥, 曾根逸人
2. 発表標題 2方向観察沈降測定法を用いたマウス受精卵の成長に伴う質量変化測定
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 張慧, 岡部圭, 菊池直樹, 大嶋紀安, 加治佐平, 坂田利弥, 和泉孝志, 曾根逸人
2. 発表標題 シリコンナノワイヤ細線化によるバイオセンサ検出感度の評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 曾根逸人
2. 発表標題 ナノスケール計測加工技術を用いた高感度バイオセンサの創製
3. 学会等名 第112回複合材料懇話会・講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hui Zhang, Kakeru Oshima, Naoki Kikuchi, Noriyasu Ohshima, Taira Kajisa, Toshiya Sakata, Takashi Izumi and Hayato Sone
2. 発表標題 Fabrication of Sub-20 nm Width Silicon Nanowire-Based Biosensor for Detecting Biomolecules at Attomolar Concentrations
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) and 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM26) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hui Zhang, Noriyasu Ohshima, Kakeru Oshima, Naoki Kikuchi, Taira Kajisa, Toshiya Sakata, Takashi Izumi and Hayato Sone
2. 発表標題 Fabrication of Highly Sensitive Silicon Nanowire Biosensor by Electron Beam Lithography for Detecting Antigen-Antibody Specific Binding at Attomolar Concentration
3. 学会等名 5th International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 9th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 曾根逸人
2. 発表標題 受精卵質量測定のためのホルダ型ピエゾ抵抗カンチレバの試作と評価
3. 学会等名 ナノプロブテクノロジー第167委員会第88回研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 張慧, 大嶋紀安, 大嶋駆, 菊池直樹, 加治佐平, 坂田利弥, 和泉孝志, 曾根逸人
2. 発表標題 電子線描画法による高感度シリコンナノワイヤバイオセンサの作製およびアトモル濃度の抗原抗体特異結合の検出
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菊池直樹, 齋藤暁子, 丸山拓希, 吉川朝哉, 外山吉治, 佐々木直哉, 張慧, 保坂純男, 坂田利弥, 曾根逸人
2. 発表標題 2方向観察沈降測定法を用いたマウス受精卵成長過程の質量測定
3. 学会等名 量子生命科学先端フォーラム2021冬の研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ナノ加工技術で高感度バイオセンサを創製 http://research.st.gunma-u.ac.jp/ei_sone/ 曾根研究室研究内容 http://sonelab.ei.st.gunma-u.ac.jp/index.html</p>

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
研究分担者	坂田 利弥 (SAKATA Toshiya) (70399400)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	張 慧 (Zhang Hui) (80794586)	群馬大学・大学院理工学府・助教 (12301)	

	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
研究協力者	齋藤 暁子 (SAITO Akiko)	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・学術専門員 (12601)	

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