

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：14603

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05493

研究課題名（和文）顕微技術を駆使した計測と制御による細胞構造のしなやかさの高精度解析

研究課題名（英文）High-precision analysis of cell structural stiffness utilizing microscope techniques for single cell measurement and control

研究代表者

細川 陽一郎（Hosokawa, Yoichiroh）

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：20448088

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 55,400,000円

研究成果の概要（和文）：原子間力顕微鏡（AFM）をもちいて植物細胞の力学構造の理解をすすめ、AFM計測により得られる外力に対する細胞の力学特性の解析に、従来法（ヘルツの接触理論）とは異なる、膨圧と細胞壁のたわみを考慮した解析理論（シェル理論）を、建築工学における構造力学の取り扱いを参考に構築し、細胞壁の弾性率と膨圧を導く方法を考案した。この方法を適用することで、AFMによる細胞形状計測とAFMによるインデンテーション試験による細胞壁のひずみ曲線（フォースカーブ）で決定されるパラメーターを用いて、これまで他の方法で推定が難しかった細胞壁の弾性率と膨圧を導くことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築工学における構造力学の理論に基づき、外力による細胞の力学応答と外力が無い場合の膨圧による細胞壁形状のひずみを定式化し、細胞壁の弾性率と膨圧を導く方法を確立することができた。本研究で提案された方法を適用することで、AFMによる細胞形状計測とAFMによるインデンテーション試験による細胞壁のひずみ曲線（フォースカーブ）で決定されるパラメーターを用いて、これまで他の方法で推定が難しかった細胞壁の弾性率と膨圧を導くことができた。本研究により、植物細胞の持つ複雑な構造に起因する力学特性がひも解かれ、植物の力学構造を微視的な観点から理解するための新たな道筋を拓くことができた。

研究成果の概要（英文）：Atomic force microscopy (AFM) is used to advance the understanding of the mechanical structure of plant cells. An analytical theory (shell theory) for considering the deflection of the cell wall was constructed with reference to the treatment of structural mechanics in architectural engineering. We devised a method for deriving the elastic modulus of the cell wall and intracellular turgor pressure. By applying this method, we could determine these parameters from the topographic measurement and the indentation test by AFM. It is difficult to estimate them by other methods. This research unraveled the mechanical properties caused by the complex structure of plant cells, and opened a new way to understand the mechanical structure of plants from a microscopic view.

研究分野：Applied Physics

キーワード：キーワード 原子間力顕微 フェムト秒レーザー フォースマッピング 顕微細胞操作 液胞制御

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

植物細胞の力学特性は、細胞壁の弾性のみにより決定されるのではなく、細胞内部での浸透圧調整によって生じる圧力（膨圧）と細胞形状により細胞壁に誘導される張力に大きく依存する。植物は、細胞内の膨圧を能動的に調節することで、環境に適応した形態を保ちながら、成長を続ける。環境に応じた植物の多様性・柔軟性を知る上で、細胞壁の弾性、膨圧、細胞形状のバランスにより決定される細胞壁の張力の寄与を知ることは不可欠である。しかしながら、植物細胞の大きさは数 100 $\mu\text{m}$ 、細胞壁の厚さはわずか数  $\mu\text{m}$  であり、そこに潜在する張力とその要素となる力を計測することは簡単ではない。近年、このような植物細胞の力学特性を知る計測手段として、ナノインデンター的一种である原子間力顕微鏡(AFM)が注目されている。

AFM による計測では、半導体製造プロセスにより作製された長さ数 100 $\mu\text{m}$ 、幅数 10 $\mu\text{m}$ 、厚さ数  $\mu\text{m}$  のシリコン製の片持ち梁 (AFM カンチレバー) の先端を試料に接触させ、梁を押し付けたときの試料の凹みと梁のたわみから、試料の弾性応力を検出する (図 1)。梁の自由端には、先端が数 nm から数  $\mu\text{m}$  球状に加工された探針が配置されており、探針が試料に押しあてられたときの試料の凹みから弾性率を推定する。

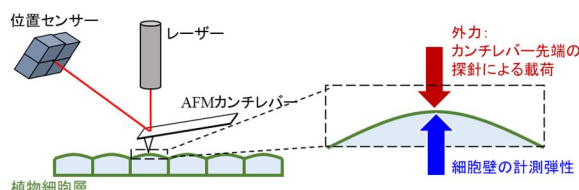


図1 原子間力顕微鏡の装置構成。AFM カンチレバーの先端に配置された探針を植物細胞 (細胞壁) に接触させ、カンチレバーを押し下げた際のカンチレバーの撓みをレーザーにより検出することで、細胞壁に作用した力と細胞壁の凹みの関係を計測する。

### 2. 研究の目的

従来 AFM による計測は、金属、半導体、プラスチックなどのバルク材料が計測対象とされ、その解析にはヘルツの接触理論が広く用いられてきた。ヘルツの接触理論では、探針の接触部の試料が探針の形状に沿って凹むことを仮定し、試料の弾性率を求める (図 2 A)。ところが植物細胞は、試料表面で細胞壁が突っ張った梁状の構造であり、これに探針を押し付けた場合、探針の接触部のみでなく、細胞壁全体がたわむと考えられ (図 2 B)、ヘルツの接触理論を適用することが難しいと考えられている。そこで本研究では、AFM で計測される試料の凹みと梁のたわみの関係を、弾性シェル理論により解析する手法を確立する。弾性シェル理論では、細胞壁をシェルとして考え、細胞の内側から膨圧により圧迫される細胞壁に、細胞の外側から AFM 探針を接触させたときの細胞壁の変形について考え、AFM による計測されたデータを適用した際に推定される細胞壁の弾性、膨圧、張力の関係についての知見を深めた。

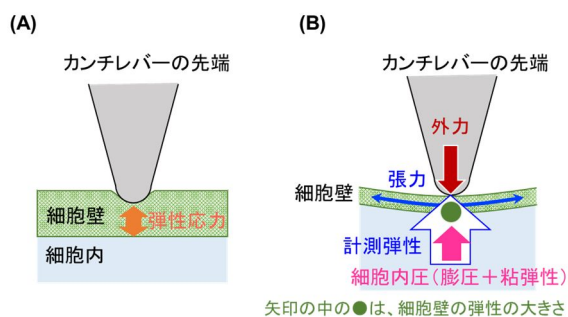


図2 ヘルツの接触理論(A)とシェル理論(B)で想定される細胞壁のたわみ。(B)において外力  $F$  の抗力となる計測弾性は、細胞壁の弾性と細胞内圧によって生じる細胞壁の張力の影響を受ける。式(2)を参照。

### 3. 研究の方法

#### 弾性シェル理論

図 3 に示すように細胞内圧  $P$  により押し上げられる面内弾性率  $E$ 、厚さ  $t$  の細胞壁の中心を、外力  $F$  で定点荷重されたときの細胞壁の面外方向への変位  $y$  は、

$$B\nabla^4 y(r) - \sigma_\infty \nabla^2 y(r) + Et\kappa_M^2 y(r) = -\frac{F}{2\pi} \frac{\delta(r)}{r} \quad (1)$$

と表すことができる。ここで  $B$  は曲げ剛性であり、 $E$  を含む。 $\sigma_\infty$  は、細胞内圧  $P$  により細胞壁に均一に荷重される応力であり、細胞壁の曲率  $\kappa_M$  が考慮されている。 $\delta(r)$  はディラックのデルタ関数であり、右辺は極座標系で示された細胞壁の面内方向の中心 ( $r=0$ ) に先鋭化された AFM 探針による荷重が表現されている。この運動方程式は、変形ベッセル関数を用いて解くことができ、 $r=0$  における外力  $F$  での細胞壁の面外方向への変位量  $y$  の関係が得られ、 $F$  と  $y$  は線形関係になる。この線形係数は、細胞壁の面外方向への変形に対するバネ定数  $k_{as}$  ( $= F/y$ ) に相当し、式(1)の解より、

$$k_{as} = \frac{\pi P f}{\kappa_M \log \frac{P f \sqrt{3(1-\nu^2)}}{Et^2 \kappa_M^2}} \quad (2)$$

の関係が得られる。 $k_{as}$  は apparent stiffness (見かけの剛性)と呼ばれているが、ここで我々は計測弾性と呼ぶことにする。計測弾性はAFMの弾性率計測により実験的に値が得られる。右辺に含まれる  $\nu$  はポアソン比であり、細胞壁では理論限界である 0.5 に近い値をとると考えられる。 $f$ は細胞壁の曲率に関する構造ファクターであり、細胞壁が球面形状である場合  $f=1$ 、円筒形状である場合  $f=2/3$  となり、AFM 計測による凹凸像 (トポグラフィ) 計測により得られる細胞壁の曲率より求めることができる。

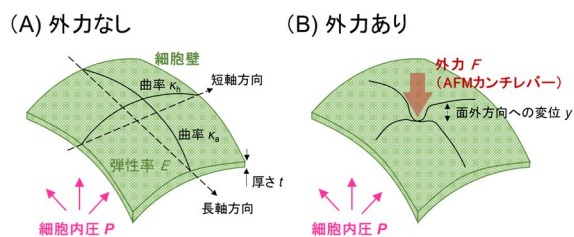


図3 細胞内圧により膨らむ細胞壁(A)に、AFM カンチレバーの先端が接触して外力が加わった場合(B)の弾性シェル理論のモデル図。

### AFM 計測の結果に基づき得られる細胞壁の弾性率と細胞内圧の関係

典型的な植物細胞としてタマネギの鱗片細胞を試料として選び、AFM による凹凸像計測と細胞壁の弾性率計測を行い、細胞の長軸方向の曲率  $\kappa_a$  と短軸方向の曲率  $\kappa_h$  の中間値  $\kappa_M$  が  $5.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$  のとき、 $k_{as}$  が  $35 \text{N/m}$  となる結果が得られている。また計測された細胞壁の曲率より、構造ファクター  $f$  は、0.818 と見積もられる。細胞壁の厚さは、電子顕微鏡などによる計測結果に基づく報告などにより、 $1.5 \mu\text{m}$  程度であると推定される。細胞壁の面方向弾性率  $E$  について実験的に調べられているが、その信憑性が疑われている。細胞内圧  $P$  は、液胞による膨圧のみでなく細胞内の動粘性を含むと考えられる。膨圧と動粘性は細胞の状態により大きく変化するが、AFM 計測をしている細胞の  $P$  を同時に計測することは不可能である。ゆえに、ここではこれらを未知数として議論を進める。細胞壁はセルロース繊維が織り込まれた構造であり、材質としてはポリマー材料や紙材料に近く、 $E$  はゴム材料よりも硬く、紙材料よりも柔らかい、 $1 \text{MPa}$  から  $1 \text{GPa}$  の範囲にあると推定される。膨圧については、細胞内外のイオン濃度を計測することにより推定されており、 $0.1 \text{MPa}$  (1 気圧) から  $1 \text{MPa}$  (10 気圧) の範囲にあると考えられる。

これらの細胞壁の力と形状に関するパラメーターの概算に基づき、 $E$  と  $P$  を変数として式(2)により  $k_{as}$  を計算した結果を図4に示す。 $E=200 \text{MPa}$  のとき、 $P=0.03 \text{MPa}$  付近で  $k_{as}$  は正と負に大きく振れる異常値をもち、 $P < 0.03 \text{MP}$  では負に振れる。これは、式(2)の右辺分母の対数項の中の値が1以下であることを示しており、導出の際の近似条件から外れた異常値である。 $P=0.03 \text{MPa}$  以上で、 $P$  の値が小さいときは  $P$  に対して負の傾きを示す分母の変化が支配的に、 $P$  の値が大きいときは  $P$  に対して正の傾きを示す分子の変化が支配的になり、 $k_{as}$  は極小値を持つ曲線になる。 $E > 200 \text{MPa}$  で  $E$  と  $P$  は同様の特徴をもつ関係となり、 $E < 200 \text{MPa}$  では異常値をもたないならかな増加曲線になる。図中に丸印で示す  $k_{as}=35 \text{N/m}$  の交点が、AFMの実験結果を満たす  $E$  と  $P$  の解となる。 $E=800 \text{MPa}$  のとき、変曲点は、 $k_{as}=35 \text{N/m}$  以上であり、解を持たない。

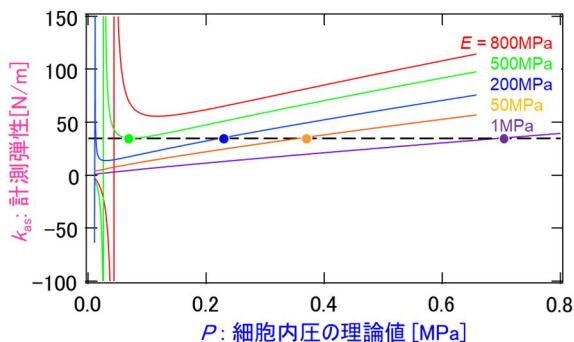


図4 AFM 凹凸像計測により評価されたタマネギの鱗片細胞の曲率 ( $\kappa_M=5.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ ) に基づく式(2)の計算結果。計測弾性  $k_{as}$  を細胞内圧  $P$  と弾性率  $E$  を変数として計算されている。点線は、AFM 弾性率計測により評価された見計測弾性の値 ( $k_{as}=35 \text{N/m}$ ) を示す。構造パラメーター:  $t=1.5 \mu\text{m}$ ;  $f=0.818$ ;  $\nu=0.5$ 。

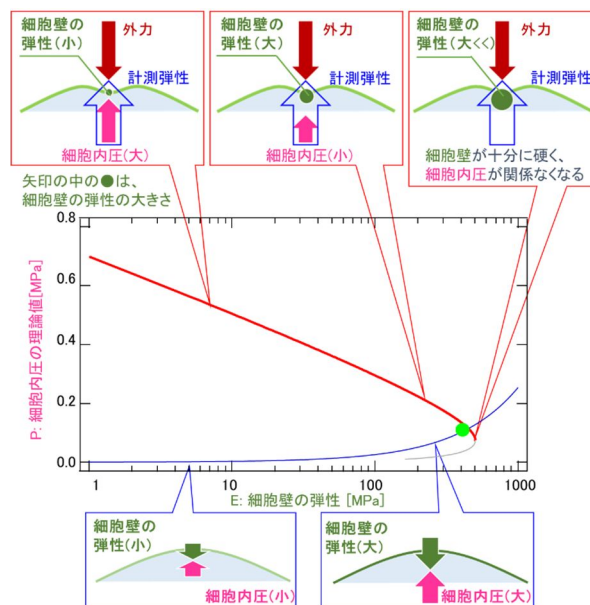


図5 AFM によりタマネギの鱗片細胞を計測した結果 ( $\kappa_M=5.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ ;  $k_{as}=35 \text{N/m}$ ) に基づき計算された式(3) (赤線) と式(4) (青線) を満たす  $E$  と  $P$  の関係。構造パラメーター:  $t=1.5 \mu\text{m}$ ;  $f=0.818$ ;  $\nu=0.5$ 。図中の緑丸は、計測された細胞をモデル化し、FEM シミュレーションにより得られた結果 ( $E=410 \text{MPa}$ ;  $P=0.11 \text{MPa}$ ) である。



AFM の計測結果として得られた計測弾性  $k_{as}=35\text{N/m}$  を満たす  $E$  と  $P$  の関係は、式(2)より、

$$E = \frac{Pf\sqrt{3(1-\nu^2)}}{t^2\kappa_M^2 \exp\left(\frac{\pi Pf}{k_{as}\kappa_M}\right)} \quad (3)$$

となり、図5の赤線を描く。グラフの上の模式図で示すように、 $E$  が小さいとき、AFM 探針の押し込みによる外力に対応する計測弾性を得るためには、大きな  $P$  を必要とする(式(2)参照)。一方で  $E$  が大きいとき、小さな  $P$  で条件を満たす計測弾性を得ることができる。 $E>500\text{MPa}$  では解を持たないが、これは、 $E>500\text{MPa}$  のとき、細胞壁は剛体とみなされ、 $P$  が外力応答  $F$  に影響を及ぼさないことが表現されていると考えられる。

式(2)と(3)では、外力  $F$  により、計測された細胞の表面形状(曲率)を保つ関係が表現されているが、細胞形状は外力がない場合でも保たれる。外力がない場合、細胞の表面形状は、細胞内圧  $P$  により細胞壁が押し上げられて伸びることにより発生する張力とのつり合いになり、その関係は、

$$P = t \frac{(\kappa_a + \kappa_h)}{f} (\varepsilon_a + \varepsilon_h) E \quad (4)$$

で表される。 $\varepsilon_a$  と  $\varepsilon_h$  は、細胞が長軸方向と短軸方向でそれぞれ曲率( $\kappa_a$  と  $\kappa_h$ )になったときに伸びた細胞壁の長さである。 $P$  と細胞壁の弾性率  $E$  は線形関係となり。 $E$  が大きくなるに従い、細胞が膨らみ形状を保つためには大きな  $P$  を必要とする(図5のグラフの下の模式図)。式(3)と式(4)を満たす交点が、実験により決定された計測弾性と細胞表面の形状から導かれる細胞壁の弾性率と細胞内圧になると考えられ、式(3)と式(4)より、

$$E = k_{as} \frac{1}{2\pi t(g_a + g_h)} \log \frac{2(g_a + g_h)\sqrt{3(1-\nu^2)}}{t\kappa_M} \quad (5)$$

$$P = k_{as} \frac{\kappa_M}{\pi f} \log \frac{2(g_a + g_h)\sqrt{3(1-\nu^2)}}{t\kappa_M} \quad (6)$$

と決定でき、本実験で得られる推測値は、 $E=450\text{MPa}$ 、 $P=0.12\text{MPa}$  となる。

#### FEM シミュレーションの結果との比較

タマネギ細胞に対する上記の AFM の計測データに基づき有限要素法(FEM)によるシミュレーションも行われている。シミュレーションでは、 $E=410\text{MPa}$ 、 $P=0.11\text{MPa}$ (図5の緑丸)の時のみで、実験で得られた細胞壁の曲率が再現された。 $E<410\text{MPa}$  のとき細胞壁は異常な膨らみを示し、 $E>410\text{MPa}$  のとき細胞壁は膨らまなくなる。第一原理計算によるシミュレーションで求められた結果と、前項で検討を進めた近似解による結果は極めて近い位置にあり、両者の計算結果の妥当性を支持している。

細胞壁の弾性率  $E$  について、AFM によるナノインデンテーションテストの結果をヘルツの接触理論により解析し、 $E$  が  $1\text{MPa}$  程度になることが多数報告されている。しかしながら、理論によって得られる弾性率が探針の先端形状や細胞内圧により大きく変化することより、その値の信憑性が疑われている。また、ヘルツの接触理論で求められるこの値は面外方向の弾性率を強く反映しており、弾性シェル理論で求められる面内方向の弾性率とは異なる物性値であるとも考えられる。植物の形状は細胞壁の硬さにより支えられており、もしその面内弾性率  $E$  が  $1\text{MPa}$  程度であるならば、植物は風船細工のような伸縮性をもつはずであるが、植物はそれよりも遥かに剛直であると思われる。また、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を駆使して、タマネギ細胞から切り出された細胞壁の引っ張り試験が報告されている。この実験では、 $E=3.7\text{GPa}$  と見積もられており、シミュレーションで得られている結果に近い。タマネギ細胞の細胞壁は、面内方向にミドルメラと呼ばれるセルロース繊維で構成されるシートが積み重なった構造を持つことが知られており、その細胞壁の面内弾性率は、ポリマー材料( $1\text{GPa}$  程度)に近く、また面外方向よりも遥かに大きな値を持つことが予測される。以上の知見を総合すると、植物細胞の硬さを司る植物細胞の面内方向の弾性率は、 $1\text{GPa}$  近傍であると推測される。

式(2)の右辺分母の対数内の分母に含まれる  $E$  は細胞壁  $t$  の 2 乗と結合しており、 $E$  は、実験により求められていない細胞壁  $t$  の不確定さを含む。図5では  $t=1.5\mu\text{m}$  で計算されているが、例えば  $t=1.0\mu\text{m}$  の場合  $E$  の値は 2.25 倍になり  $E$  の値は  $1\text{GPa}$  程度となる。一方で、 $t=2.5\mu\text{m}$  の場合  $E$  の値は 2.7 分の 1 になり、 $100\text{MPa}$  程度となる。つまり、ここで求められている  $E$  は、1 桁程度の誤差を含んでいると考えられる。

$E$  が  $400\text{MPa}$  程度であったとした場合、細胞内圧  $P$  は、 $0.1\text{MPa}$ (1 気圧)程度であると見積もられる。しかし先行研究で、細胞内外の浸透圧差や巨大な植物細胞に圧力センサーを導入して計測された内圧は、 $1\text{Pa}$ (10 気圧)に到達するものもあり、ここで見積もられる値はそれらよりも 1 桁近く小さい。この結果を解釈するためには、式(2)中の  $P$  に結合する構造ファクター  $f$  に加え、細胞壁構造の不安定要素に起因するマジックファクターを考えねばならない。上記のとおり、細胞壁は面外方向に極めて低い弾性率をもつ可能性があり、また一方では細胞壁を裏で支える 2 次細胞壁構造をもったりもしており、単純な平面の等方弾性体ではない。 $0.8$  程度の構造ファクター  $f$  に加え、 $0.1$  から  $0.5$  程度の細胞壁構造の不安定に由来する調整ファクターを  $P$  に結合させると、先行研究に基づいた植物細胞の  $E$  と  $P$  の関係を説明することができる。

#### 4．研究成果

本研究により得られた弾性シェル理論による解析方法とその指針により、植物細胞の構造特性、さらには生理機能との関連性を明瞭にしていける新たな指針を構築することができた。ただしこの方法では、従来用いられてきたヘルツの接触理論による解析よりも、構造、物性に関わるパラメーターが圧倒的に増え、個体差の大きい細胞に対して、これら全てを実験により正確に同定することは極めて困難である。今後、植物学者が弾性シェル理論を理解し、細胞の生理応答を構造と力学の観点からも理解し、解明していくことが重要であり、その普及に努めたいと考えている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoneda Arata, Ohtani Misato, Katagiri Daisuke, Hosokawa Yoichiroh, Demura Taku	4. 巻 9
2. 論文標題 Hechtian Strands Transmit Cell Wall Integrity Signals in Plant Cells	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plants	6. 最初と最後の頁 604 ~ 604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/plants9050604	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 Rukmana Taufiq Indra, Moran Gabriela, Meallet-Renault Rachel, Clavier Gilles, Kunieda Tadashi, Ohtani Misato, Demura Taku, Yasukuni Ryohei, Hosokawa Yoichiroh	4. 巻 5
2. 論文標題 Photoinjection of fluorescent nanoparticles into intact plant cells using femtosecond laser amplifier	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 APL Photonics	6. 最初と最後の頁 066104 ~ 066104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0001687	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 該当する
1. 著者名 Rukmana Taufiq Indra, Yasukuni Ryohei, Moran Gabriela, Meallet-Renault Rachel, Clavier Gilles, Kunieda Tadashi, Ohtani Misato, Demura Taku, Hosokawa Yoichiroh	4. 巻 13
2. 論文標題 Direct observation of nanoparticle diffusion in cytoplasm of single plant cells realized by photoinjection with femtosecond laser amplifier	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 117002 ~ 117002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abc490	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 該当する
1. 著者名 Akita Eri, Yalikun Yaxiaer, Okano Kazunori, Yamasaki Yuki, Ohtani Misato, Tanaka Yo, Demura Taku, Hosokawa Yoichiroh	4. 巻 37
2. 論文標題 In situ measurement of cell stiffness of Arabidopsis roots growing on a glass micropillar support by atomic force microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant Biotechnology	6. 最初と最後の頁 417 ~ 422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5511/plantbiotechnology.20.1016a	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 Hao Yansheng, Cheng Shaokoon, Tanaka Yo, Hosokawa Yoichiroh, Yalikus Yaxiaer, Li Ming	4. 巻 45
2. 論文標題 Mechanical properties of single cells: Measurement methods and applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biotechnology Advances	6. 最初と最後の頁 107648 ~ 107648
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biotechadv.2020.107648	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 該当する

1. 著者名 Okano Kazunori, Wang Chung-Han, Hong Zhen-Yi, Hosokawa Yoichiroh, Liao Ian	4. 巻 24
2. 論文標題 Selective induction of targeted cell death and elimination by near-infrared femtosecond laser ablation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biochemistry and Biophysics Reports	6. 最初と最後の頁 100818 ~ 100818
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bbrep.2020.100818	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 該当する

1. 著者名 Zhang Tianlong, Namoto Misuzu, Okano Kazunori, Akita Eri, Teranishi Norihiro, Tang Tao, Anggraini Dian, Hao Yansheng, Tanaka Yo, Inglis David, Yalikus Yaxiaer, Li Ming, Hosokawa Yoichiroh	4. 巻 11
2. 論文標題 Hydrodynamic particle focusing enhanced by femtosecond laser deep grooving at low Reynolds numbers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-81190-y	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 該当する

1. 著者名 Suda Hiraku, Mano Hiroaki, Toyota Masatsugu, Fukushima Kenji, Mimura Tetsuro, Tsutsui Izuo, Hedrich Rainer, Tamada Yosuke, Hasebe Mitsuyasu	4. 巻 6
2. 論文標題 Calcium dynamics during trap closure visualized in transgenic Venus flytrap	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Plants	6. 最初と最後の頁 1219 ~ 1224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41477-020-00773-1	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 該当する

1. 著者名 Kurita Yuko, Kanno Satomi, Sugita Ryohei, Hirose Atsushi, Ohnishi Miwa, Tezuka Ayumi, Deguchi Ayumi, Ishizaki Kimitsune, Fukaki Hidehiro, Baba Kei'ichi, Nagano Atsushi J., Tanoi Keitaro, Nakanishi Tomoko M., Mimura Tetsuro	4. 巻 -
2. 論文標題 Visualization of seasonal phosphorus re-translocation, and expression profile of phosphate transporters in a shortened annual cycle system of the deciduous poplar tree	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 bioRxiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1101/2020.04.12.038562	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 -

1. 著者名 山本 浩太郎、三村 徹郎	4. 巻 55
2. 論文標題 植物細胞におけるアルカロイドの単一細胞質量分析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 植物の生長調節	6. 最初と最後の頁 100 ~ 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18978/jsr.p.55.2_100	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 -

1. 著者名 Zhen-Yi Hong, Kazunori Okano, Dino Di Carlo, Katsunori Tanaka, Yaxiaer Yalikus and Yoichiroh Hosokawa	4. 巻 297
2. 論文標題 High-speed micro-particle manipulation in a microfluidic chip by directional femtosecond laser impulse	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 111566
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sna.2019.111566	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 該当する

1. 著者名 Yoichiroh Hosokawa	4. 巻 Vol.58, No.11
2. 論文標題 Applications of femtosecond laser-induced impulse to cell research	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JJAP invited review	6. 最初と最後の頁 110102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab4749	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 Taufiq Indra Rukmana, Gabriela Moran, Rachel Meallet-Renault, Misato Ohtani, Taku Demura, Ryohei Yasukuni & Yoichiroh Hosokawa	4. 巻 9
2. 論文標題 Enzyme-Assisted Photoinjection of Megadalton Molecules into Intact Plant Cells Using Femtosecond Laser Amplifier	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 17530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-54124-y	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 該当する

1. 著者名 安國 良平, Rukmana Taufiq Indra, 大谷 美沙都, 出村 拓, 細川 陽一郎	4. 巻 -
2. 論文標題 フェムト秒レーザーを用いたTobacco BY植物細胞への巨大高分子導入	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 光・量子デバイス研究会資料	6. 最初と最後の頁 17-19
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 -

〔学会発表〕 計29件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 細川陽一郎
2. 発表標題 Single cell manipulations utilizing femtosecond laser impulse and the physics
3. 学会等名 第58回日本生物物理学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋田絵理
2. 発表標題 マイクロデバイス上でのAFM計測による成長する植物細胞の力学状態の評価
3. 学会等名 日本植物学会第84回大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 細川陽一郎
2. 発表標題 超短パルスレーザーが拓く単一細胞の操作・計測技術
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tetsuro Mimura
2. 発表標題 Dynamics of vacuolar function in plant cell
3. 学会等名 Lecture on Plant Cell Biology and Physiology at Department of Agronomy and Horticulture, Faculty of Agriculture IPB University, Bogor, Indonesia（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 細川陽一郎
2. 発表標題 顕微技術を駆使した計測と制御による細胞構造のしなやかさの高精度解析
3. 学会等名 新学術領域研究「植物構造オプト」第2回班会議（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takanori Maeno, Takanori Uzawa, Izumi Kono, Kazunori Okano, Takanori Iino, Taro Ogawa, Osamu Iwata, Takuro Ito, Kengo Suzuki, Keisuke Goda, Yoichiroh Hosokawa
2. 発表標題 Femtosecond laser photoporation of fluorogenic peptide aptamers for highly sensitive imaging of polysaccharides in <i>Euglena gracilis</i>
3. 学会等名 The 8th International Congress on Laser Advanced Materials Processing（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Ajikawa, Tomoyuki Suzuki, Yalikul Yaxiaer, Yoichiro Hosokawa
2. 発表標題 Acoustic cell arrangement in micro-fluidic chip for cells sorting by femtosecond laser-induced impulsive force
3. 学会等名 M&BE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Yalikul, Z. Tianlong, C. Fang, M. Namoto, Y. Hosokawa
2. 発表標題 Particle Arrangement in Microfluidic Chip by Additive Femtosecond Laser Processing in the Channel
3. 学会等名 15th International Conference on Laser Ablation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoichiro Hosokawa
2. 発表標題 Femtosecond Laser-induced Impulsive Force in Applications for Cell Research
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yansheng Hao, Chaoying Fang, Ming Li, Yaxiaer Yalikul, Yoichiro Hosokawa
2. 発表標題 A Transparent Flow Velocity Sensor of Ultra-thin Glass Sheet Fabricated by Femtosecond Laser Processing
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 Tianlong Zhang, Misuzu Namoto, Chaoying Fang, Ming Li, Yalikul Yaxiaer, and Yoichiroh Hosokawa
2. 発表標題 Femtosecond Laser-processed Pattern on Glass Substrate for Focusing Microparticles in Fluid
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 秋田絵理, 竹林竜, 岡野和宣, Yalikul Yaxiaer, 岸田佳祐, 國枝正, 出村拓, 澤進一郎, 細川陽一郎
2. 発表標題 ガラス製マイクロデバイスを用いた植物組織のAFM力学計測
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 竹林竜, 秋田絵理, 岡野和宣, 安國良平, 細川陽一郎
2. 発表標題 原子間力顕微鏡とフェムト秒レーザーを用いた細胞組織の力学特性解析
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 Taufiq Indra Rukmana, Gabriela Moran, Rachel Meallet-Renault, Misato Ohtani, Taku Demura, Ryohei Yasukuni, Yoichiroh Hosokawa
2. 発表標題 Photoinjection of Fluorescence Nanoparticles into Plant Cells Using Femtosecond Laser Amplifier with Additional Enzyme Treatment
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 岸田 佳祐, 國枝 正, 津川 暁, 細川 陽一郎, 出村 拓
2. 発表標題 VND7木部道管細胞誘導系を用いたシロイヌナズナの二次細胞壁パターン形成制御の解析
3. 学会等名 日本植物学会第83回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋田絵理, 竹林竜, 岡野和宣, Yalikus Yaxiaer, 岸田佳祐, 國枝正, 大谷美沙都, 出村拓, 澤進一郎, 細川陽一郎
2. 発表標題 AFM力学計測のための新規ガラスマイクロデバイスの開発
3. 学会等名 植物構造オプト第1回若手の会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹林竜, 秋田絵理, 岡野和宣, 細川陽一郎
2. 発表標題 フェムト秒レーザーアブレーション法とAFMを組み合わせた単一植物細胞の力学計測装置の開発
3. 学会等名 植物構造オプト第1回若手の会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田勇真, Taufiq Indra Rukmana, 岡野和宣, 安國良平, 細川陽一郎, 出村拓, 大谷美沙都
2. 発表標題 フェムト秒レーザーを用いた単一植物細胞への巨大分子導入
3. 学会等名 植物構造オプト第1回若手の会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本将也, 阿路川雄介, 寺西教裕, 安國良平, 細川陽一郎
2. 発表標題 マイクロデバイス中でのフェムト秒レーザー誘起衝撃力の数値解析
3. 学会等名 植物構造オプト第1回若手の会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸田佳祐, 國枝正, 津川暁, 秋田絵理, 岡野和宣, 細川陽一郎, 出村拓
2. 発表標題 シロイヌナズナ木部道管細胞誘導系によって形成される二次細胞壁の力学的解析
3. 学会等名 植物構造オプト第1回若手の会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細川陽一郎
2. 発表標題 AFM Force Measurement of Arabidopsis Utilizing Femtosecond Laser Processing and Glass Micro-Device
3. 学会等名 熊本大学ミニシンポ "Strategies of mechanical optimization in plants " (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細川陽一郎
2. 発表標題 フェムト秒レーザー誘起衝撃力を利用した細胞間の力学相互作用の解明
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 竹林竜, 秋田絵里, 岡野和宣, 安國良平, 細川陽一郎
2. 発表標題 フェムト秒レーザーと原子間力顕微鏡を用いた単一植物細胞の力学計測
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安國良平
2. 発表標題 フェムト秒レーザーを用いた植物細胞へのナノ粒子導入
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryu Takebayashi, Eri Akita, Kazunori Okano, Ryohei Yasukuni, Misato Ohtani, Taku Demura and Yoichiroh Hosokawa
2. 発表標題 Imaging of elasticity of Arabidopsis root cells by atomic force microscopy
3. 学会等名 陽明大学セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryu Takebayashi, Eri Akita, Kazunori Okano, Ryohei Yasukuni, Misato Ohtani, Taku Demura and Yoichiroh Hosokawa
2. 発表標題 Force mapping of Arabidopsis root cells by atomic force microscop
3. 学会等名 2019 Annual Meeting of the Physical Society of Taiwan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹林 竜, 秋田 絵里, 岡野 和宣, 安國 良平, 大谷 美沙都, 出村 拓, 細川 陽一郎
2. 発表標題 原子間力顕微鏡による植物細胞表面の弾性分布の観察
3. 学会等名 応用物理学会関西支部 平成30年度第3回支部講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安國 良平, Rukmana Taufiq Indra, 大谷 美沙都, 出村 拓, 細川 陽一郎
2. 発表標題 フェムト秒レーザーを用いたTobacco BY植物細胞への巨大高分子導入
3. 学会等名 光・量子デバイス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoichiro Hosokawa
2. 発表標題 Detection and manipulation of single plant cells by fs laser and AFM
3. 学会等名 ISMO-NAIST Symposium
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	安國 良平	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教	2023年度より、大阪工業大学, 工学部, 准教授
	(Yasukuni Ryohei)		
	(40620612)	(14603)	

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	三村 徹郎  (Mimura Tetsuro)  (20174120)	東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・特任研究員    (12601)	2023年度より、京都先端科学大学，バイオ環境学部，教授

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