

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 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：2010～2014

課題番号：22120010

研究課題名(和文)フェムト秒レーザーを駆使した植物細胞の局所操作と刺激法の開発

研究課題名(英文)Methodology development to manipulate and to stimulate single plant cells utilizing femtosecond laser

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・物質創成科学研究科・准教授

研究者番号：20448088

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 58,200,000円

研究成果の概要(和文)：高強度のフェムト秒レーザーを顕微鏡で生体材料に集光すると、集光点では効率的な多光子吸収により、切断現象と爆発現象が引き起こされる。本研究課題では、これらの現象を利用した、植物生理学研究に適した新しいレーザー細胞操作・計測技術を開発し、実践した。多光子吸収による選択加工技術を利用し、1細胞レベルで植物固体の機能阻害をおこなえる実験系を確立した。レーザー誘起衝撃力による植物細胞の力学操作技術を利用し、植物細胞内のオルガネラ間の接着力を定量評価する技術を確立した。さらにレーザー誘起氷化現象を利用して植物の凍結耐性を調べる方法、レーザーによる単一植物細胞への外部分子導入手法などの技術開発を推進した。

研究成果の概要(英文)：When an intense femtosecond laser is focused on biological materials under microscope, they are dissected at the laser focal point because of the effective multiphoton absorption. Furthermore, when the laser is focused into aqueous medium, an explosion is induced at the laser focal point and shock- and stress- waves propagate and act to the surrounding material as an impulsive force. In this research program, we developed new methodology to investigate plant physiology adapting these phenomena to plants. Physiological function of plant was inhibited by the laser processing of targeted cells inside plant body. Adhesion between intercellular suborganelles were broken by the impulsive force and the adhesion strength was quantified convening with technique of atomic force microscopy. Furthermore, we developed new methods to investigate freezing tolerance of plant body utilizing laser-induced ice formation phenomenon and to introduce exogenous molecules to single plant cells.

研究分野：レーザー応用工学

キーワード：フェムト秒レーザー 植物細胞 レーザーマイクロダイセクション レーザー細胞操作 レーザー衝撃波

1. 研究開始当初の背景

光エネルギーをフェムト(10^{-15})秒の時間領域に集中させたフェムト秒レーザーを顕微鏡により集光した場合、レーザー集光点で多光子吸収が引き起こされる。さらに、レーザーエネルギーが十分に強い場合、集光点では光吸収に留まらず、切断現象や爆発現象が引き起こされる。フェムト秒レーザーにより物質にエネルギーが注入される時間スケールは、光エネルギーが熱エネルギーに変換される時間スケール(ピコ(10^{-12})秒からナノ(10^{-9})秒)よりも遙かに短く、その結果、レーザーを固体材料に集光したときには機械的な掘削に近い切断現象が、液体材料に集光したときには衝撃波伝搬に伴う爆発現象が起こる。

我々はこれまでの研究で、分子性材料におけるこのようなフェムト秒レーザーが誘起する破壊現象の特異性を世界に先駆けて見いだしてきた。さらに、フェムト秒レーザーに特徴的な現象を利用した細胞操作が、動物細胞のみならず、植物細胞の操作にも非常に有効であることを実験的に示してきた。

近年では、フェムト秒レーザーを多光子顕微鏡の光源としての利用の他、単一細胞内のオルガネラを破壊し、その影響を調べようとする試みがなされている。しかし、上記のフェムト秒レーザーで最も特徴的な性質である多光子吸収による切断現象や爆発現象を、植物生理学の研究に十分に生かされている研究例はない。本研究課題ではこのような現状に新しい展開をもたらすべく、フェムト秒レーザーの特性を最大限に生かし、植物試料の個体全体から細胞内オルガネラの柔軟な非接触操作を実現し、それを植物生理学の研究に役立てようとした。

2. 研究の目的

本研究では、これらの背景に基づき、これらのフェムト秒レーザーで誘導される特有の現象を積極的に利用した、新規な植物生理学研究のためのレーザー細胞操作・計測技術を確立しようとした。これまで我々が確立してきた(a)多光子吸収による3次元的な選択加工・操作技術(直接型レーザー操作)、(b)レーザー誘起衝撃力による植物細胞の力学操作技術(間接型レーザー操作)を植物試料に駆使することにより、植物生理学研究の有力なツールと成り得る実験手法の新技术開発を進めた。

上記の目的を達成するために、本新学術領域研究においてフェムト秒レーザーを利用した多くの共同研究を実施し、我々が開発してきた実験手法の有用性についての検討を進めた。本報告書では、その中でも顕著な成果を得ることができた下記の4項目の研究結果について報告する。

(成果1) フェムト秒レーザー加工によるシロイヌナズナの避陰反応メカニズムの探索(計画研究ア・長谷あきら教授との共同研究)

(成果2) フェムト秒レーザー誘起衝撃力を

用いた光依存的なペルオキシソームと葉緑体の物理的相互作用の解明(計画班カ・西村幹夫教授との共同研究)

(成果3) フェムト秒レーザー誘起氷化現象を利用した植物の凍結耐性メカニズムの解明(計画班イ・上村松生教授との共同研究)

(成果4) フェムト秒レーザーを利用した単一植物細胞内への外部分子導入(奈良先端大バイオサイエンス研究科出村拓教授、同研究科米田新助教、計画研究ア・長谷あきら教授との共同研究)

3. 研究の方法

図1に顕微鏡下で高強度フェムト秒レーザーを集光照射するための実験系を示す。再生増幅器付きチタンサファイアレーザーシステム(780 nm、250 fs、500 μ J/pulse)から出力されるレーザーパルス列(1 kHz or 20 Hz)を倒立顕微鏡に導入し、対物レンズにより試料溶液に集光照射した。レーザー照射の様子は透過顕微鏡像として CCD カメラもしくは共焦点イメージングシステムにて観察できるようになっている。顕微鏡下での光軸方向(Z 方向)の集光位置は、顕微鏡手前に配置されたレンズ対により制御できるようになっており、カメラの結像位置にくるように調整されている。実験は数 10 μ J/pulse 程度のパルスエネルギーでおこなわれた。

(成果1)の実験では、10 倍の対物レンズにより、試料であるシロイヌナズナの芽生えに 1 kHz のパルス列を集光照射した。(成果2)の実験では、20 Hz のパルス列から単発レーザーパルスを機械シャッターにより取り出し、試料であるシロイヌナズナの葉の細胞に 100 倍の対物レンズで集光し、その挙動を共焦点システムにより観察した。(成果3)の実験では、20 Hz のパルス列から取り出した単発パルスを、過冷却状態にある試料に、10 倍の対物レンズで集光し、高速カメラにより観察した。(成果4)の実験では、1 kHz のパルス列を試料であるタバコ細胞に 100 倍の対物レンズで集光し、その挙動を共焦点システムにより観察した。

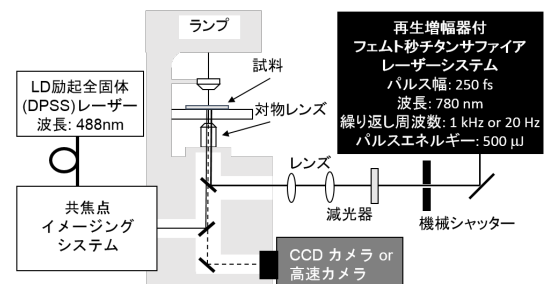


図1 フェムト秒レーザーシステム

本研究課題の全ての実験は、このフェムト秒レーザーシステムと倒立顕微鏡を組み合わせたシステムによって行われた。それぞれの実験で、検出系(CCDカメラ、高速カメラ、共焦点システム、AFMシステム)の組み合わせは異なる。

4. 研究成果

(成果1) 植物は、他の物体により自らへの太陽光の照射が阻まれたとき、他の物体の陰から逃れようとする(避陰反応)。この機能発現には、植物のもつ光受容蛋白質の一つであるフィトクロム(Phytochrome)が関与し、フィトクロムが光受容した情報により、植物成長ホルモンであるオーキシン(Auxin)の伝達が制御され、陰から逃れる植物の生長が促されるとされている。ここで光受容したフィトクロムがオーキシンの伝達を直接的に制御するわけではなく、その間をつなぐシグナル伝達機構があると考えられているが、未知である。本研究では、シロイヌナズナの芽生で誘導されるオーキシンの伝達をフェムト秒レーザーにより茎を掘削加工することにより阻害し、その影響を調べた。シロイヌナズナの芽生では、双葉が受ける光の影響をフィトクロムが感知し、双葉から茎へオーキシンが伝達し、茎の伸張が制御される。本研究では、茎の先端部分(茎頂)をフェムト秒レーザーにより掘削し、そこでのオーキシンの伝達を阻害した。

図2にフェムト秒レーザーにより加工したシロイヌナズナの芽生を示す。フェムト秒レーザーによる茎の掘削部分に熱変性の影響が見られず、細い針で突き刺した様な穴を空けることができた。もちろん、細い針を用いてもこの様な小さな穴を空けることは難しく、またできたとしても、その周囲に機械的な損傷が残る。フェムト秒レーザーの三次元選択性に優れた非熱的な加工を施すことにより初めて、周辺組織の破壊の少ない、非常に再現性の高い茎の掘削が実現したと言える。

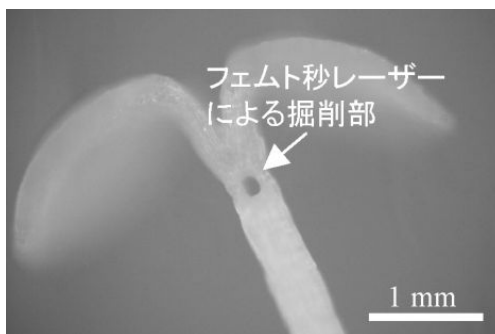


図2 シロイヌナズナ茎頂下部の掘削

茎頂下部の掘削部に、レーザーによる熱変性は観察されず、茎頂から茎へのオーキシン伝達が阻害された以外は、シロイヌナズナの生理活性は乱されなかった。

図3に、双葉に遠赤色光(800nm 付近の光)を照射したときの茎の伸張挙動の比較を示す。フェムト秒レーザーによる茎の加工がない場合には、遠赤色光照射した場合、茎は大きく伸張した。しかし、フェムト秒レーザーにより茎を加工した場合、茎の伸張はほとんど見られなかった。この結果は、フェムト秒レーザーによる茎の加工部で、双葉から茎へ送られる成長制御シグナルの伝達が阻害さ

れたことを示す。つぎに、フェムト秒レーザーにより加工した茎をオーキシン添加した溶液に浸し、同様の遠赤色光の照射実験を行った。このときレーザー加工を施していないときとほぼ同様の茎の伸張過程が見られた。この結果は、オーキシンが茎の成長制御に関与していることを示す。一方で、加工部から浸透したオーキシンが茎の伸張を直接的に促すのであれば、遠赤色光を照射していない時にも、同様の茎の伸張が観察されるはずである。つまり、遠赤色光を照射していない時には茎の伸張が促されないこの結果は、茎の伸張に、オーキシン以外の成長制御因子が存在する明確な証拠である。

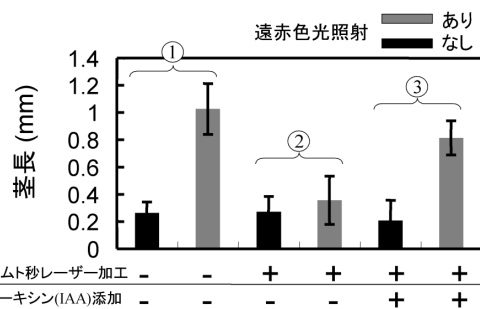


図3 フェムト秒レーザー加工による双葉から茎への物質伝達阻害

フェムト秒レーザー加工により、正常な光応答による茎の伸張は阻害される。しかし、そこにオーキシンを添加した場合、正常な光応答による茎の伸張がみられた。

(成果2) 高等植物において光合成は、細胞内の葉緑体でおこなわれるが、植物では葉緑体での光合成を最適化するため、光の照射方向に葉を向けたり、光強度に応じて細胞内の葉緑体の位置を調節したり、光合成の効率に合わせて細胞内の代謝を制御したりする多くの補助機能が存在する。本研究では、そのような光合成補助機能の一つである葉緑体とペルオキシソームの相互作用に注目した。ペルオキシソームは数ミクロンの大きさの細胞内オルガネラであり、植物細胞内では、光合成における植物細胞の代謝を補助する役割を果たすと考えられている。

西村らによりペルオキシソームを緑色蛍光蛋白質(GFP)により染色し、植物細胞に光を照射した状態(明状態)と照射していない状態(暗状態)でその挙動を観察した結果、明状態ではペルオキシソームは葉緑体に積極的に接着し、暗状態では葉緑体に接着しない挙動が示された。この結果より、明状態における葉緑体の光合成を、葉緑体にペルオキシソームが接着して補助していることが示唆された。

この仮説を明らかにするためには、明状態と暗状態にある葉緑体とペルオキシソームの接着力を評価する必要がある。しかし、密閉空間である植物細胞内のオルガネラ同士の接着強度を調べることは極めて難しい。光

ピンセットによりペルオキシソームを捕捉し、葉緑体から引き剥がすことにより接着力を測定する方法が当初提案された。しかしながらペルオキシソームは、細胞内の液体と同等の屈折率しか持っておらず、光ピンセットでペルオキシソームを捕捉することは極めて難しい。そこで本研究では、我々が独自に開発を進めているフェムト秒レーザー誘起衝撃力を用いた細胞内の微小物体の操作方法を応用し、葉緑体とペルオキシソームの接着力を調べた。

図4に実験模式図を示す。高倍率(100倍)の対物レンズを用いることにより、フェムト秒レーザーを1 μm以下のスポットに集光することができ、10 μm以内の領域に局在した衝撃力を誘導することができる。この衝撃力を葉緑体とペルオキシソームの境界に作用させることにより、葉緑体からペルオキシソームを剥離させる実験を行った。

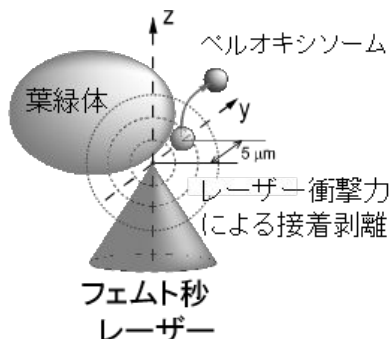


図4 フェムト秒レーザーによるペルオキシソームの剥離実験の模式図

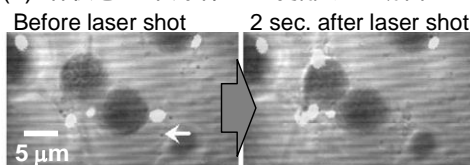
葉緑体とペルオキシソームの接着面から約 5 μm 離れた位置に単発のフェムト秒レーザーパルスを集光照射し、そこで発生する衝撃力を作用させることにより、葉緑体からペルオキシソームを剥離させた。

図5に、その代表例を示す。暗状態にある葉緑体とペルオキシソームの接着(a)は、明状態にある接着(b)と比べて明らかに弱く、レーザー衝撃力により、葉緑体に接着したペルオキシソームを簡単に引き剥がすことができた。この実験を複数の標的に対して繰り返し行い、葉緑体からペルオキシソームを剥離できる確率とそのレーザー光強度依存性を調べた。その結果、暗状態のペルオキシソームの剥離確率は、明状態よりも高く、葉緑体とペルオキシソームの接着強度は暗状態の方が弱いことを示唆する結果が得られた。また、明状態と暗状態の両方で、剥離確率がレーザー光強度と共に増加し、強い衝撃力が作用したときにペルオキシソームの剥離確率が増加する結果が得られた。

剥離確率は、個体差による葉緑体とペルオキシソームの不確実性およびレーザー集光条件の不確実性に起因すると考えられる。これらの原因による分散を正規分布で近似できると考え、剥離確率から接着力の中間値と分散を求めようとした。例えば、接着力の中

間値となる力がペルオキシソームに作用したとすると、その接着確率は50%となる。

(a) 暗状態で葉緑体から剥離する場合



(b) 明状態で葉緑体から剥離しない場合

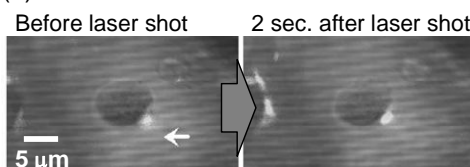


図5 ペルオキシソームの葉緑体からの剥離

矢印にレーザーを集光照射した時、(a)の場合、近傍にあるペルオキシソーム(白い球状粒子)が葉緑体(黒い球状粒子)から剥離した。一方で(b)では剥離がみられなかった。

この定量評価を進めるにあたり、実験で使用したレーザー光強度でペルオキシソームに作用する力を定量する必要がある。そこで、ペルオキシソームの代わりに原子間力顕微鏡(AFM)のカンチレバーを配置し、その振動挙動からペルオキシソームに作用する力のレーザー光強度依存性を求めた。接着力の不確実性が正規分布に近似できるとき、剥離確率から求められる偏差値とレーザー光強度から求められるペルオキシソームに作用した力は、線形関係にあると考えられる。解析データは線形性を示すものであり、上記の実験の仮定が概ね妥当であることが示された。

解析により得られた結果より、葉緑体とペルオキシソームの接着力が細胞内の熱揺らぎによるブラウン運動による力程度であり、明状態の接着力は、暗状態の2.5倍程度であることが示された。これは植物細胞内で、葉緑体とペルオキシソームの接着が、熱ゆらぎを利用することにより極めて小さいエネルギーで制御されていることを示している。葉緑体は、光エネルギーから生化学エネルギーを生産する光合成のための器官であり、この機能を最適化するために大きなエネルギーを使用すると、その目的に矛盾をきたす。本実験結果は、植物が熱揺らぎを利用して極めて小さいエネルギーで光合成を最適化していることを示す結果であり、植物生理学のみならず生物物理学的な観点からも極めて興味深い。

(成果3) 地球上には氷点下に達する厳しい環境で生息する植物が数多く存在する。植物細胞内が氷化し、凍結した場合、細胞内の構造が破壊されて死滅してしまうが、低温環境で生息する植物は凍結耐性を強めることで、凍結から身を守っている。植物の凍結耐性については様々な研究が行われているが、植物

細胞内外での凍結の詳細なメカニズムは未だに明らかになっていない。植物細胞内外で発生する氷の挙動を直接観察することができれば、氷結晶の発生に起因する植物の凍結耐性や低温馴化メカニズムの解明につながると期待される。

フェムト秒レーザーが顕微鏡下で誘導する爆発現象は非熱的な過程であることが知られており、我々はこの爆発現象が氷化誘導の外力として利用できると考えた。我々は顕微鏡下で過冷却状態にある溶液を保持できる試料ホルダーを作製し、そこにフェムト秒レーザーを照射することにより、その集光点から氷化が誘導できることを世界で初めて見出した。この方法を用いることにより、顕微鏡下で非接触に、氷化現象を時空間的に完全に制御することが可能となった。本研究では、植物の不凍物質が氷化に与える影響に注目し、植物個体からの抽出液及び生体分子添加水溶液に対してフェムト秒レーザーによる氷化誘導実験を行った。氷結晶の形状と成長の挙動を高速カメラを用いて観察し、植物の凍結耐性メカニズムについて検討した。

図6に純水(-5.0)及びシロイヌナズナ(低温未馴化、低温馴化)からの抽出液(-5.0)にフェムト秒レーザーを集光照射した際に発生した氷結晶の高速カメラ画像を示す。シロイヌナズナ抽出液中では、純水中とは異なる6分枝以上の樹状氷結晶が発生し、一定の速度で成長した。シロイヌナズナ抽出液中での氷結晶の成長速度は、純水中よりも減少した。低温馴化個体抽出液の方が低温未馴化個体抽出液中よりも成長速度が減少した。また、凍結耐性の強いライムギの細胞外抽出液を用いた実験も行い、同様の結果が得られた。

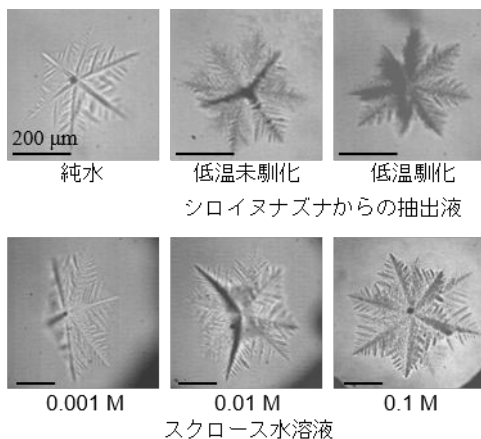


図6 植物個体からの抽出液からの氷結晶発生
レーザー照射により純水中とは異なる6分枝以上の樹状結晶が発生した。高濃度の糖水溶液でも同様の結晶発生が観察されている。

植物は低温に馴化する際に糖濃度を増加させることが知られており、先に述べた氷化挙動には糖が関係している可能性が高い。糖(グルコース、スクロース)を添加した水溶

液(-5.0)で同様の実験を行った結果、抽出液中と同様の6分枝以上の樹状氷結晶が発生する割合は、糖濃度と共に増加した。また、氷結晶の成長速度は糖濃度の増加に伴って減少し、水溶液中で発生する氷結晶は、糖分子を排除しながら成長する必要があるため、糖分子が多い水溶液ほど成長速度が減少し、氷結晶形が乱れたと考えられる。

これらの結果から、植物は体内の糖濃度を増加させることで、細胞外で氷化が起こる場合に成長速度の遅い多分枝の樹状氷結晶を発生させ、氷結晶が細胞に与える損傷を抑制しようとする機構が凍結耐性の一因であることが示唆された。

(成果4) 生物を構成する細胞の持つ機能は遺伝子によって制御されているため、単一細胞レベルで遺伝子を導入できると、細胞の機能を人為的に制御することができる。また、特定の細胞に蛍光性分子を導入できると、細胞の持つ機能を可視化できる。このような背景の下、近年では単一細胞レベルでの細胞外物質の導入の試みがなされている。しかし、単一植物細胞に選択的に遺伝子導入を行う手法の確立には至っていない。この原因として、植物細胞に特有である堅牢な細胞壁が、レーザーによる細胞外から分子を導入するための貫通孔形成を阻んでいる可能性が考えられる。さらには植物細胞の大半を占める液胞による膨圧により、貫通孔が形成されたとしても、内部分子が外部に流出すが、外部分子が内部に流入することはないためであると考える。

本研究では、短時間の酵素処理により細胞壁を緩く変性させ、高濃度のマンニトールを培養液に添加することで浸透圧調整し、細胞内の膨圧を緩和した状態で、外部分子を導入することを試みた。

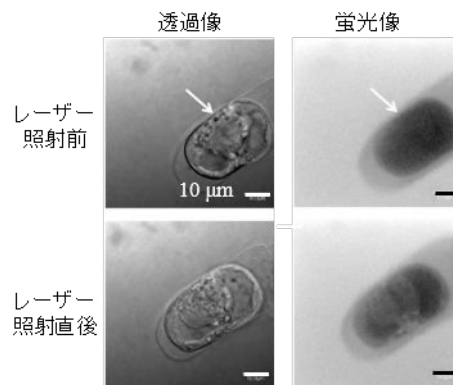


図7 タバコ細胞への巨大分子の導入
酵素処理により細胞壁を変性させ、Mannitolにより浸透圧調整したタバコ細胞に対して、矢印の箇所レーザー照射し、遺伝子と同程度のサイズ(2MDa)のFITC-Dextranを導入することに成功した。

図7に、培養タバコ細胞に対して上記の処理を施し、プラスミドと同程度の大きさ(>

MDa: Mega Dalton) の蛍光標識した Dextran をフェムト秒レーザー照射によりおこなった結果について示す。細胞壁にレーザー照射を行った結果、細胞内の細胞質と考えられる箇所のみ、Dextran に修飾した蛍光分子 (FITC) に起因すると考えられる蛍光強度の上昇が観察された。MDa サイズの分子をレーザーにより植物細胞内に導入した報告は、知る限りなく、我々の方法は、遺伝子を導入できる可能性を切り拓いた。今後、DNA プラスミドなどの導入を検討し、単一細胞レベルの遺伝子操作手法の確立を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 21 件)

K. Oikawa, S. Matsunaga, S. Mano, M. Kondo, K. Yamada, M. Hayashi, T. Kagawa, A. Kadota, W. Sakamoto, S. Higashi, M. Watanabe, T. Mitsui, A. Shigemasa, T. Iino, *Y. Hosokawa, *M. Nishimura, Physical interaction between peroxisomes and chloroplasts elucidated by in situ laser analysis, *Nature Plants*, 査読有, Vol. 1, Article number: 15035 (2015)
DOI:10.1038/nplants.2015.35

M. Takenaka, T. Iino, A. Nagatani, *Y. Hosokawa, Nanoscale bending movement of biological micro-object induced by femtosecond laser impulse and its detection by AFM, *Appl. Phys. Express*, 査読有, Vol. 7, No. 8, pp. 087002_1-4 (2014)
DOI:10.7567/APEX.7.087002

DOI:10.7567/APEX.7.087002

細川陽一郎. バイオ分野に注目されるフェムト秒レーザー細胞プロセス. 査読有、応用物理, 82, 63-67. (2012)

T. Higaki, N. Kutsuna, Y. Hosokawa, K. Akita, K. Ebine, T. Ueda, N. Kondo, *S. Hasezawa, Statistical organelle dissection of Arabidopsis guard cells using image database, LIPS, *Sci. Rep.*, 査読有, Vol. 2, pp.405_1-405_9 (2012)
DOI:10.1038/srep00405

DOI:10.1038/srep00405

Y. Hosokawa, H. Ochi, T. Iino, A. Hiraoka, *M. Tanaka, Photoporation of biomolecules into single cells in living vertebrate embryos induced by a femtosecond laser amplifier, *PLoS ONE*, 査読有, Vol. 6, No. 11, pp. e27677_1- e27677_7 (2011)
DOI: 10.1371/journal.pone.0027677

DOI: 10.1371/journal.pone.0027677

〔学会発表〕(計 103 件)

D. Katagiri, S. Sakaguchi, A. Yoneda, T. Demura, Y. Hosokawa, Evaluation of trade-off between femtosecond laser manipulation and viability of plant cell, PSROC 2015 Annual Meeting, Jan. 28-30, 2015, Hsinchu (Taiwan)

小林啓恵, 平塚奏太郎, 庞 磊, 宮沢豊, 藤井伸治, 長谷あきら, 細川陽一郎, 高橋秀幸, シロイヌナズナの水分屈性に機能する細胞群の解析, 日本植物学会第 78 回大会, 2014 年

9 月 12-18 日, 明治大学 (神奈川県川崎市)

及川和聡, 真野昌二, 林誠, 山田健志, 近藤真紀, 東正一, 渡辺正勝, 三ツ井敏明, 飯野敬矩, 重政彰徳, 細川陽一郎, 西村幹夫, フェムト秒レーザーを用いた光依存的オルガネラ間接着力評価, 第 55 回日本植物生理学会年会, 2014 年 3 月 18 - 20 日, 富山大学 (富山県富山市) 招待講演

細川陽一郎, フェムト秒レーザーによる顕微鏡下での氷化の時空間制御, 北海道大学 低温科学研究所シンポジウム「結晶表面・界面での成長カインेटイクスの理論とその場観察」, 2014 年 1 月 14 - 15 日, 北海道大学 低温科学研究所 (北海道札幌市) 招待講演

細川陽一郎, フェムト秒レーザー誘起衝撃力が拓くバイオテクノロジー, レーザー学会 学術講演会第 33 回年次大会, 2013 年 1 月 28-30 日, 姫路商工会議所 (兵庫県姫路市) 招待講演

細川陽一郎, Application of femtosecond laser processing for investigation of plant perception, 第 53 回日本植物生理学会年会, 2012 年 3 月 16 日-18 日, 京都産業大学 (京都府京都市) 招待講演

Y. Hosokawa, Non-contact quantification of laser micro-impulse in water by atomic force microscopy and its application for biomechanics, SPIE Smart Nano+Micro Materials and Devices, Dec. 4 - 7, 2011, Melbourne (Australia) 招待講演

〔図書〕(計 2 件)

細川陽一郎「ひかりエネルギー革命 - グリーンフォトニクス - 」第 5 章 1 項: 植物工場, 化学同人(株), 83-90 (2012) (分担執筆)

細川陽一郎「先端固体レーザー」第 8 章 2 章 10 項: バイオ応用, オーム社, 304-306 (2013) (分担執筆)

〔その他〕

ホームページ等

http://mswebs.naist.jp/LABs/env_photo_greenbio/Index/index.html

6. 研究組織

(1) 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・物質創成科学研究科・准教授

研究者番号: 20448088

(2) 研究分担者

飯野 敬矩 (IINO Takanori)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・特任助教

研究者番号: 90709601