

食材への超音波洗浄の適用

東京大学 尾田 正二・坂口 正明
三井不動産㈱ 奥野 雅也・増田 大樹

1. はじめに

超音波洗浄は、食材、特に植物性食材（野菜、果物）の表面に存在する土埃などの汚れと細菌を除去するために古くより使用されている。物理的に洗浄除去するため、あるいは細菌を破壊、殺菌するためにはより強力な音波が有効であり、より強力な音波を発生する洗浄装置が希求され、開発・使用されてきた⁽¹⁾⁽²⁾。

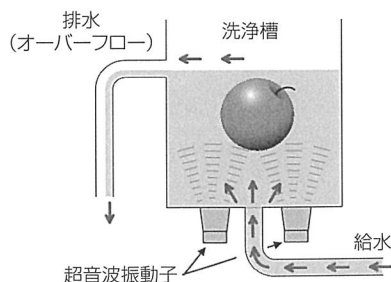
2011年の福島第一原発事故により東日本の広範囲な地域が放射能汚染された際、千葉県柏市を含む東葛地域では農産物の風評被害が発生した⁽³⁾⁽⁴⁾。我々は野菜の表面に土埃として付着する放射能を除去するために野菜専用の超音波洗浄機を開発した^{(5)~(8)}。生物である野菜、果物類の組織を破壊しないために当該の装置では使用する超音波の強度を弱く調整していることに加え、円筒形の洗浄槽の底面中央より洗浄水を供給しつつ（噴流式）超音波処理を行うことが特色である。

野菜、果物に加えてさまざまな食材を超音波洗浄した結果、我々は弱い超音波を用いることによって動物性の組織である肉類、魚介類を組織を破壊する

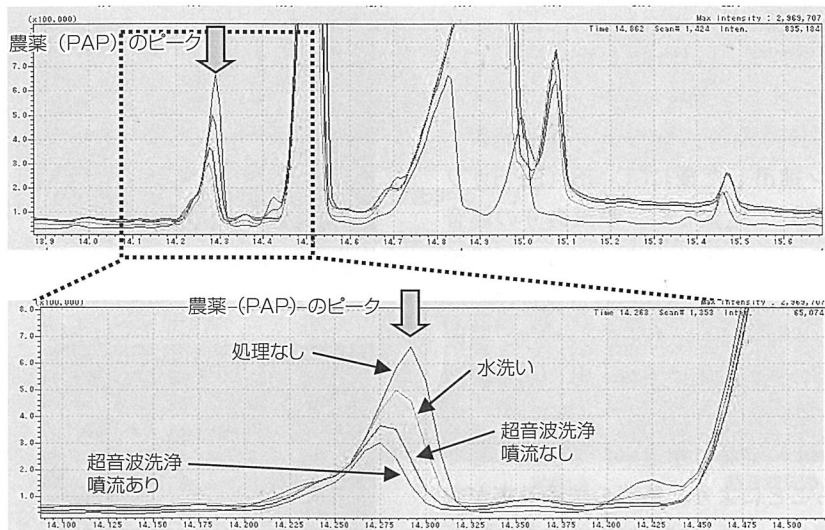
ことなく超音波洗浄することが可能であること、アサリ、エビなどの複雑な外部形状を有する水産物を洗浄することによって臭みが消え風味が大きく改善すること、また、肉類の表層に形成される空気酸化した過酸化脂質層が超音波処理でのキャビテーション効果によって洗浄除去されることにより臭みが消え食味が劇的に改善することを見出した⁽⁵⁾。また、野菜類の超音波洗浄では洗浄効果に加えて野菜が活性化する現象を確認し、その分子メカニズムの一端を解明した⁽⁸⁾。本稿では、我々が見出した超音波の食材処理におけるさまざまな効果を紹介する。

2. 噴流式超音波洗浄機の概要

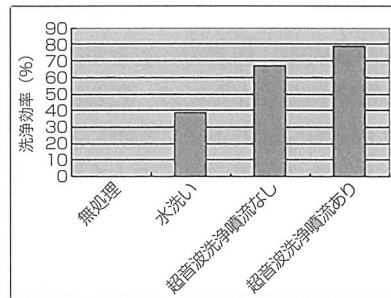
作製した噴流式超音波洗浄機の外観と動作原理を第1図に示す。円筒形の洗浄槽の底部より清浄な洗浄水（通常は上水道水を使用する。海水、温水、ウルトラファインバブル水等でも可）を噴流（毎分0.5~2 L）として供給しつつ、40 kHzの超音波洗浄を行うことを可能とする。洗浄水は洗浄槽上部に設置するオーバーフロー口より排水される。動物性の食材を洗浄する場合には、洗浄かごを使用する等の



第1図 噴流式超音波洗浄機の試作機と原理図



(a) 超音波洗浄後にチンゲン菜に残留するフェントエートを計測したクロマトグラム



(b) 超音波洗浄後のチンゲン菜と洗浄効率の比較

第2図 チンゲン菜に塗布したフェントエートの洗浄除去の例

方法により3～20 psiの強度の超音波を与えることにより、細胞・組織が破壊されることを回避しつつ超音波洗浄を実行できる。

3. 野菜・果物の超音波洗浄

3-1 土埃、雑菌、匂い、残留農薬を洗浄除去

市販されているブドウ、リンゴ、レモンなどの果物類、シイタケ、エノキダケなどのキノコ類を超音波洗浄（40 kHz、10～15分間）することにより、表面に付着する土埃り・泥汚れ、雑菌、ワックス等を除去できる。また、モヤシ、レタス、エノキダケ等では腐敗臭等の悪臭が消えて香りが良くなる。保湿および防カビの目的で輸入レモンに塗布されているワックス剤は水溶性ではないために水洗いではほとんど除去されないが、超音波洗浄により除去することが可能である。放射性セシウムが付着した土埃り

が表面に付着することにより野菜、果物、キノコ類が放射能汚染されている場合には、超音波洗浄により放射能の一部を除去することが可能である。一方、植物細胞・組織の内部に侵入した放射性物質を超音波洗浄により除去することは不可能である。

凹凸のある葉が複雑に折りたたまれる葉物野菜（キャベツ、レタス、白菜、ホウレン草等）、形状が複雑なカリフラワー、ブロッコリーの類、表面に微細な毛様構造を有する枝豆、オクラの類、あるいはシイタケ、エノキダケなどのキノコ類を洗浄する目的において超音波洗浄は極めて有効である。

イチゴは果肉が著しく柔らかく洗浄中の軽微な物理的衝撃によっても容易に果肉が傷んで商品価値を失うことになるために出荷前に洗浄することはない。しかし、超音波洗浄であればイチゴを痛めることはなく、洗浄した後も冷蔵庫に保存すれば数日間

は果肉が傷んで白色化することがない。

有機リン系の殺虫剤であるフェントエート（PAP、商品名：エルサン）を自家栽培したチンゲン菜に塗布して1日後に超音波洗浄し、チンゲン菜に残留するPAPをアセトン抽出した後にGC-MS（HP-5カラム、Agilentを使用）で定量した。噴流ありの超音波洗浄の洗浄効率は、水洗いだけの場合の203%（103%アップ）であり、噴流なしの超音波洗浄の洗浄効率は水洗いの場合の174%（74%アップ）、噴流ありの超音波洗浄の洗浄効率は噴流なしの超音波洗浄の116.8%（16.8%アップ）であった（第2図）。超音波洗浄時に洗浄水（通常は水道水）を噴流として洗浄槽に供給することにより、農薬の洗浄効率が向上することを確認した。特に非水溶性の農薬の場合には、超音波処理中は被洗浄物表面から農薬が乖離するものの、超音波処理が終わると同時に疎水性の農薬はもとの被洗浄物表面に疎水的に結合するので洗浄による除去の効率は高くない。超音波処理中に洗浄水を噴流させることによって乖離した農薬は洗い流されるので、洗浄効率が向上するものと考えている。

3-2 植物の活性化

我々はレタス、ホウレン草などの葉物野菜を超音波洗浄した際に、超音波洗浄した葉物野菜がみずみずしさを回復して再び葉を広く広げ、さらに回復したみずみずしさが長く持続することを見出した（第3図）。超音波処理したホウレン草と同じ時間を水に浸漬したホウレン草とを準備し、それぞれの葉において発現する遺伝子を網羅的に解析したところ、エチレンシグナルを抑制するEthylene-insensitive 3 Binding F-box protein 1 および 2 (EBF1、EBF2) 遺伝子の発現が超音波処理によって誘導され、アブシジン酸による気孔の閉口が阻害されないために吸収された水が失われず、ホウレン草のみずみずしさが長く持続することを見出した⁽⁸⁾。また、エチレンに加えてジャスモン酸シグナルも活性化しており、超音波処理によって植物の細胞内で遺伝子発現を伴う活性化が誘導されていることが強く示唆された。表層の雑菌も超音波洗浄によって除去されるために、超音波洗浄による活性化と相乗して野菜、果物の日持ちが大きく延長されるものと考えられる。超音波処理によって種子の発芽、植物細胞の代謝、あ



(a) 超音波洗浄した小松菜



(b) 超音波洗浄したホウレン草

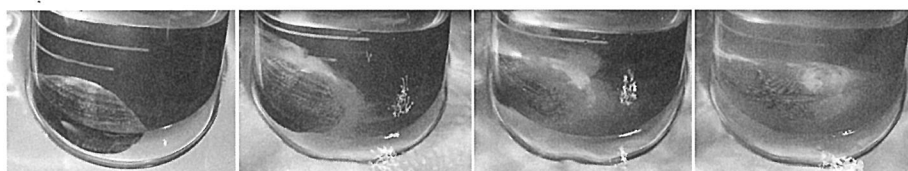
第3図 超音波洗浄した野菜における活性化

るいは骨細胞の造骨機能が活性化されることが既に複数の研究者によって報告されており^{(9)~(12)}、超音波が細胞を活性化する効果があることは間違いないものと考えられ、今後の研究により新しい細胞生理学の研究領域が拓がるものと期待される。

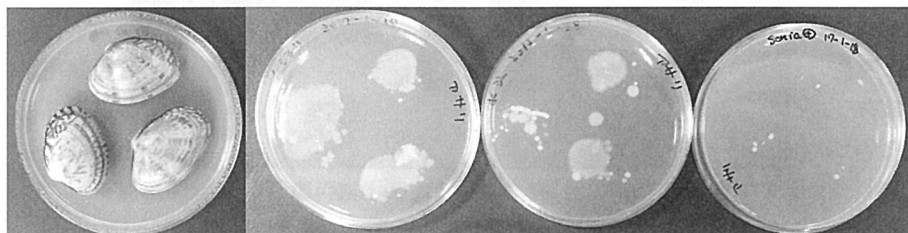
4. 肉類、魚介類の超音波洗浄

4-1 アサリ、シジミ

生きているヒメタニシ (*Bellamya quadrata histrica*) を超音波洗浄（40 kHz、10 min）した後もヒメタニシが生存していたことから、我々は噴流式超音波洗浄機を使用して魚介類を洗浄した。市販されている生きているアサリを水道水中にて超音波洗浄（40 kHz、10 min）すると貝殻表面の彫刻の凹部に残存する泥汚れ、ないしはバイオフィームが煙のように洗い出される様が観察された（第4図(a)）。同じ効果を市販のシジミ（ヤマトシジミ）でも観察したが、殻の表面が平滑であるハマグリでは観察されなかった。洗浄したアサリ、シジミを調理して食すると泥臭さが完全に消失して美味であった。アサリ、



(a) 超音波洗浄中のアサリ



洗浄前

水洗い

超音波洗浄

(b) 超音波洗浄したアサリの表面に残留する雑菌量の測定

第4図 アサリの超音波洗浄

シジミとともに砂泥地に生息するため、殻の表面には泥が付着し、かつバイオフィームが形成されている。漁獲されて消費地に流通するまでに短くとも数日は経過することを考慮すると、殻の表面のバイオフィームが流通の過程で腐敗することが悪臭の原因と考えられる。また、アサリの洗浄液には低濃度（飲用する基準値の1/3）の鉛が含まれる場合があったことから、殻の表面の泥を洗浄除去して調理することは健康リスクの軽減の上で有効であると結論できる。洗浄したアサリ、シジミを家庭用冷凍庫で1か月以上冷凍保存が可能であったが、冷凍保存したアサリを超音波洗浄した場合には殻の中で身が崩れるなどして調理には不適であった。

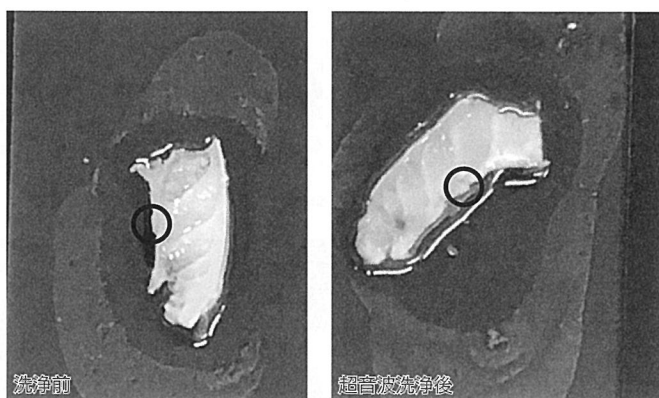
4-2 エビ・カニ類

エビ、カニ類は多数の脚を有し、かつ棘を有するなど外骨格が複雑な形状をしている上に底生生活をしている種が多く、体表面の泥、バイオフィームを完全に洗浄除去することが困難である。アサリと同じく産地から消費地である都市に流通する間に体表面の体液などを雑菌が代謝して特有の匂いを発することとなり、多くの消費者が敬遠するほか、アレルギーを誘発する原因ともなる。アルゼンチン産の赤エビ（解凍）を超音波洗浄（40 kHz、3～5 min）することによって体表を清浄にすると悪臭が消え、また体表の雑菌が除去された。イセエビ、ロブスター等を調理前に洗浄することにより、雑味を減じて食

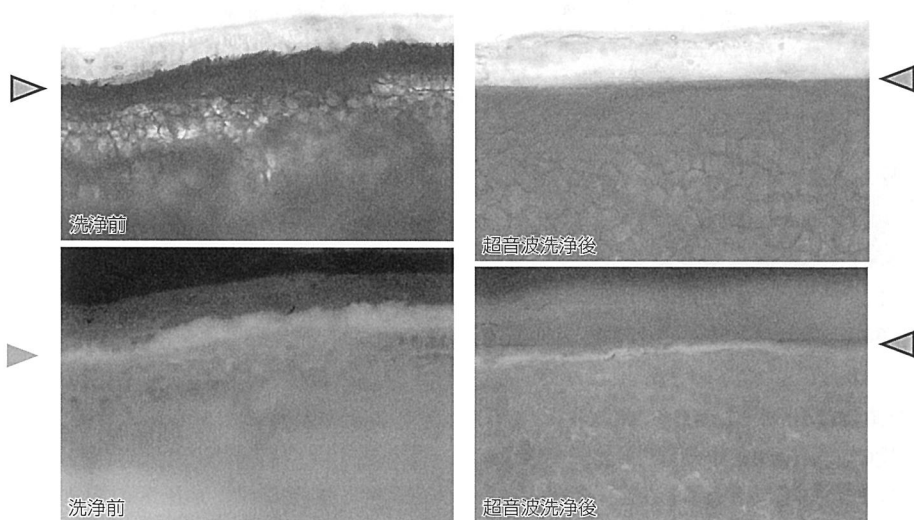
材本来の味と風味を引き出すことが可能となる。アメリカザリガニを食する習慣のある中国ではすでにアメリカザリガニを超音波洗浄しているとの報道がある¹³⁾。

4-3 魚介類

超音波洗浄（40 kHz、3～5 min）により体表の体液、ぬめり、バイオフィームを除去することにより、生の魚（アユ、イワシ、タイ）の臭みが除去される。アジ、サンマ、ホッケの開き等の魚類の干物を超音波洗浄することも可能である。洗浄後に表面の水をペーパータオルで拭き取り、焼き調理すると水っぽくなることはなく臭みが減少し、美味となる。超音波洗浄中に白い霧状の物質が塩サバ、塩シャケの表面から洗浄水中に噴出する。過酸化脂質を選択的に染色する蛍光試薬（Liperfluor）を用いた検証により¹⁴⁾、塩サバの表層にある過酸化脂質が超音波のキャビテーション効果によってミセル化して洗浄水中へ洗浄除去されていることが判明した（第5図）。流通される間に塩サバの表層の脂質が空気酸化されて過酸化脂質となり、それが広く嫌われる臭みの原因となっているが、表層の過酸化脂質が除去されて空気酸化する前の新鮮な状態での風味に戻ると考えられる。同様に冷凍赤魚フィレ肉の冷凍焼けの匂いも除去でき、煮魚として調理すると臭みがなく美味であり、また煮汁を冷やすと煮凝りができる。冷凍保存の期間が長くてフィレ肉の奥深くまで脂質の酸



(a) 超音波洗浄前後の塩サバ



(b) 超音波洗浄前後の塩サバの薄切切片の顕微鏡観察像（上段）と過酸化脂質の蛍光染色像（下段）

第5図 塩サバの超音波洗浄

化が進行している場合には、超音波洗浄しても風味の改善効果はない。魚類だけでなく、イカ、ホタテ貝、ツブ貝、エビ・カニの身を同様に処理すると臭みが軽減し風味が改善する。調味料を使用して味を改善する方法では、化学物質を加えておいしくするのに対して、超音波洗浄による食味の改善では過酸化脂質を除去しておいしくする。化学物質を使用して我々の味覚を騙して「おいしく」するのではなく、長期間の流通のために酸化してしまっている食材を、我々の味覚が本来として望む新鮮な状態＝未酸化な状態に戻す全く新しい調味法である。さらに、臭みが軽減するために、醤油などの調味料による味付けが薄味でよくなり、減塩にも効果がある。

刺身を超音波洗浄（40 kHz、3～5 min）すると臭みが軽減するものの、水っぽくなる。生理食塩水中で超音波洗浄することによって水っぽくなることは回避できるが、塩味が増すので、刺身の超音波処理には依然として課題が残っている。

4-4 牛肉、豚肉、鶏肉、結着肉

牛肉、豚肉、鶏肉を超音波処理（40 kHz、3～5 min）することにより臭みがなくなる。特に鳥皮などの脂肪が多い組織の臭みがなくなり、風味が改善する。ただし、同時に肉本来のうま味、風味が減じるのでそれらのトレードオフになる。冷凍焼けの匂いも除去される。さらに、臭みが軽減するために、焼き肉のたれなどの調味料による味付けが薄味でよくな



アサリ



シジミ



塩サバ



シヤケ切り身



鶏もも肉

第6図 洗浄の動画へのリンク

り、減塩にも効果がある。魚介類の場合と同様に表層の過酸化脂質が除去されるためと考えられる。また、超音波洗浄した肉は食感が柔らかくなり、例えばチキンソテーを冷蔵庫内で一晩保存しても固くならない。硬直している筋原線維が超音波の振動で揺すられることによってほどけるものと推測される。一方、牛脂注入肉および結着肉に対しては、超音波処理によって追加した脂肪分が抜けてしまい、食味が失われてしまうので、超音波処理は禁忌であった。

5. 超音波処理による米研ぎ

超音波洗浄（40 kHz、5～10 min）により白米が十分に吸水し、米研ぎ後の浸漬が必要なく、超音波洗浄後すぐに市販の炊飯器で通常モードで炊飯が可能である。芯まで吸水しているために炊き上がりが美しく、また糠臭さを感じられない。超音波洗浄して炊飯したご飯は冷えても固くならず、冷蔵・冷凍した後に電子レンジで加温して食しても美味である。

精白した米の表面に残存する糠を除去することにより水の浸透を促すのが米研ぎの目的である。栄養に富む糠はむしろ白米に残していっしょに食するのが好ましくらいである。超音波洗浄による米研ぎでは、白米の表面の空気酸化した糠のみが除去されるものと推測される。超音波による米研ぎは炊飯の作業効率を大いに高めるとともにおいしいご飯を炊くことができるので、家庭向けに今後広く普及するものと予想される。

6. おわりに：まとめ

超音波洗浄の技術は長らく食材を洗浄する目的だけに用いられてきた。しかし近年、超音波処理が生命現象をさまざまに修飾することを示す研究結果が蓄積しつつある^{(9)~(12)}。洗浄効果と活性化効果は食材の消費期限を延長し、あるいは食材の食味を改善す

る効果があるのは間違いない事実と思われる。また、植物を活性化する効果は、農業においてさまざまな活用が期待される。さらに、肉類、魚介類において過酸化脂質が除去され食味が改善する効果は、健康増進の観点から極めて望ましい効果である。何かを加えておいしくするのではなく、何かを引いておいしくなるのであるから、そのおいしさは真のおいしさ、すなわち体が欲している食材であることを示す。食は動物の健康にとって最大最強の環境因子であり、食をあるべき食にすることが、超音波洗浄によって可能であることを我々は見出した。病になってから対処するのではなく、生活習慣を見直し病になることを予防することが今後の医療には必要であり主流となる。予防医療の社会を構築する上で、食材の超音波洗浄は強力なツールとなる。

超音波洗浄により基準値下の残留農薬等の有害物質をさらに除去した食材を食することは健康の源であり、予防医療の一丁目一番地である。また、食品として余分である臭みがなくなることにより、醤油、焼き肉のたれなどの調味料による味付けが薄味でよくなるので、減塩食に適している。本技術が組み込まれたシステムキッチンが普及して多くの家庭で食材を洗って食する生活が広まるとともに、食すべき食を食すべき子供たちが食べる学校給食、また体力が弱まっている入院患者のための病院食に食材の超音波洗浄が適用されることを本技術の開発者として強く期待する。

<参考文献>

- (1) Bilek,S.E., & Turantas,F.: Decontamination efficiency of high power ultrasound in the fruit and vegetable industry, a review. International Journal of Food Microbiology, 166: 155-162 (2013) <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.06.028>.
- (2) Alenyorege,E.A., Ma,H., Ayim,I., Zhou,C., Wu,P., Hong,C., and Osae,R.: Effect of multi-frequency ultrasound surface washing treatments on *Escherichia coli* inactivation and some quality characteristics of non-heading Chinese cabbage. Journal of Food Processing and Preservation, 42(10): e13747 (2018) <https://doi.org/10.1111/jfpp.13747>.
- (3) 五十嵐泰正 (著)・「安全・安心の柏産柏消」円卓会議：みんな

- なで決めた「安心」のかたち、ポスト3.11の「地産地消」をさがした柏の一年、亜紀書房、ISBN-13：978-4750512303（2012）
- (4) Iimoto T, Fujii H, Oda S, Nakamura T, Hayashi R, Kuroda R, Furusawa M, Umekage T, and Ohkubo Y. : Measures against increased environmental radiation dose by the TEPCO Fukushima Dai-ichi NPP accident in some local governments in the Tokyo metropolitan area : focusing on examples of both Kashiwa and Nagareyama cities in Chiba prefecture. *Radiat Prot Dosimetry*. 152(1-3) : 210-214 (2012)
(<https://doi.org/10.1093/rpd/ncs224>)
- (5) 日本国特許第5863557号 超音波洗浄装置 (2013)
- (6) 日本国実用新案登録第3187858号 超音波洗浄装置 (2016)
- (7) 日本国特許第6095087号 超音波洗浄装置、及び超音波洗浄方法 (2017)
- (8) Oda S., Sakaguchi M., Yang X., Liu Q., Iwasaki K, and Nishibayashi K. : Ultrasonic treatment suppresses ethylene signaling and prolongs the freshness of spinach. *Food Chemistry : Molecular Sciences*, 2, 100026 (2021)
<https://doi.org/10.1016/j.fochms.2021.100026>.
- (9) Yang,H., Gao,J., Yang,A., and Chen,H. : The ultrasound-treated soybean seeds improve edibility and nutritional quality of soybean sprouts. *Food Research International*, 77 : 704-710 (2015)
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.011>.
- (10) Ding,J., Hou,G.G., Nemzer,B.V., Xiong,S., Dubat,A., & Feng,H. : Effects of controlled germination on selected physicochemical and functional properties of whole-wheat flour and enhanced γ -aminobutyric acid accumulation by ultrasonication. *Food Chemistry*, 243 : 214-221 (2018)
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.128>.
- (11) Yu,J., Engeseth,N.J., and Feng,H. : High intensity ultrasound as an abiotic elicitor - effects on antioxidant capacity and overall quality of romaine lettuce. *Food and Bioprocess Technology*, 9, 262-273 (2016)
<https://doi.org/10.1007/s11947-015-1616-7>.
- (12) Macione,J., Long,D., Nesbitt,S., Wentzell,S., Yokota,H., Pandit,V., and Kotha,S. : Stimulation of osteoblast differentiation with guided ultrasound waves. *Journal of Therapeutic Ultrasound*, 3, 12 (2015)
<https://doi.org/10.1186/s40349-015-0034-7>.
- (13) 中国のザリガニ洗濯機、5分間で200匹を洗う、*Science Portal China* (2022年11月1日閲覧)
https://spc.jst.go.jp/news/150501/topic_4_01.html
- (14) Yamanaka K., Saito Y., Sakiyama J., Ohuchi Y., Oseto F. and N.Noguchi : A novel fluorescent probe with high sensitivity and selective detection of lipid hydroperoxides in cells. *RSC Advances*, 2(20) : 7894 (2012)

【筆者紹介】

尾田 正二

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科
先端生命科学専攻 准教授

坂口 正明

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科
先端生命科学専攻 特任研究員

奥野 雅也・増田 大樹

三井不動産㈱ 柏の葉街づくり推進部