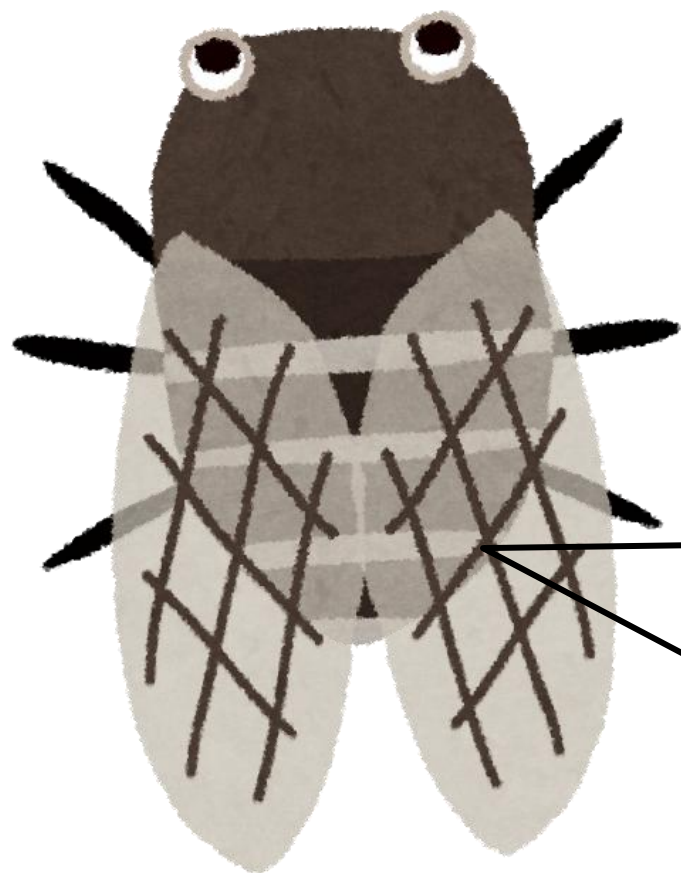


レーザー生成ナノ構造のソフト材料表面への 転写と物理的効果由来の抗菌性評価手法

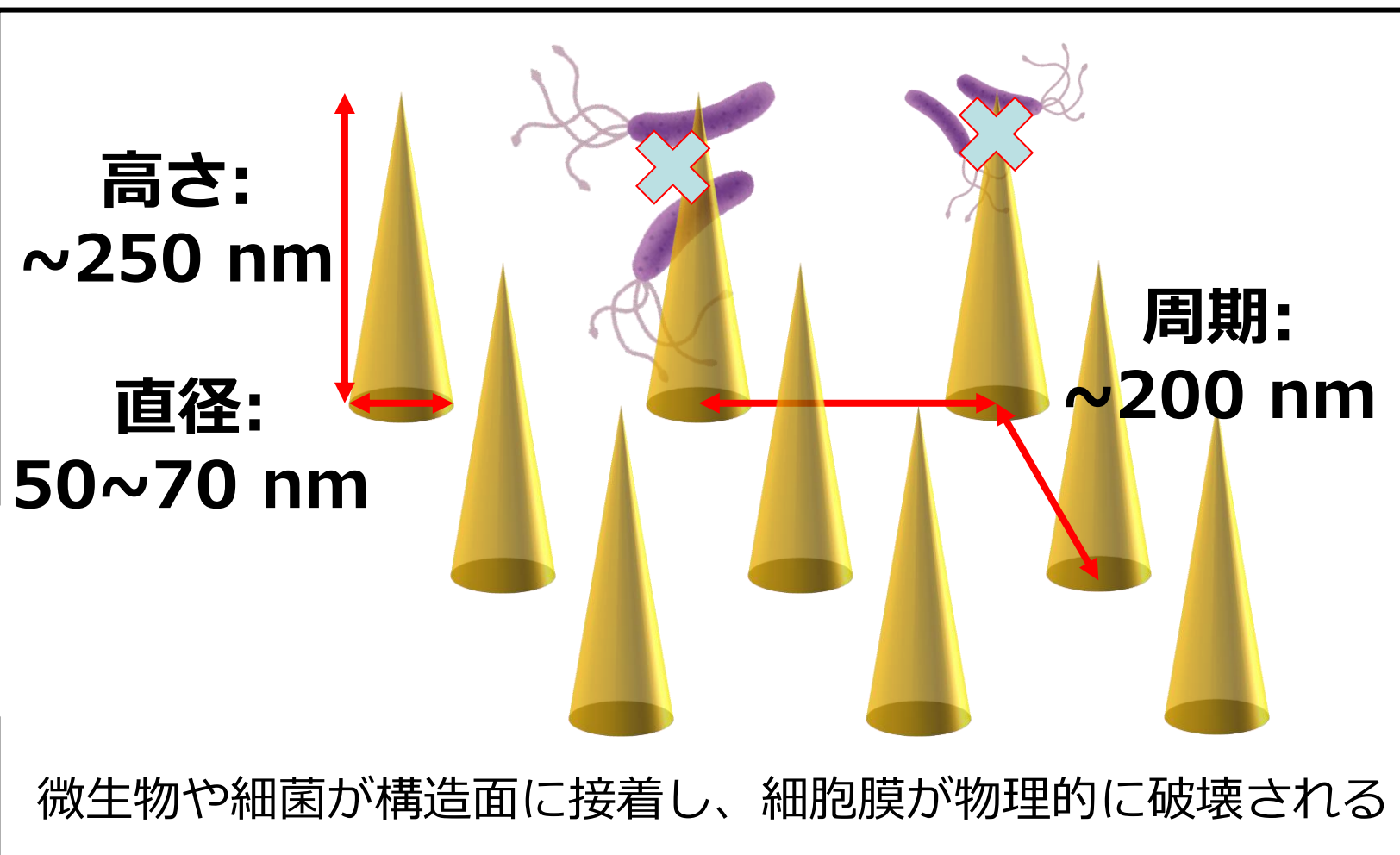
理化学研究所 光量子工学研究センター
先端レーザー加工研究チーム
内山 茂

2026年6月16日

-昆虫の羽根における抗菌効果-



セミ



微細な突起（ナノピラー・ナノスパイク）
構造による物理的抗菌効果の発現 [1]

-抗菌性の発現-

抗菌性

化学的（薬剤塗布等）

- ◎ 作製プロセスが簡便
- ◎ 材料種に依存しない
- ◎ 抗菌機構の設計が容易

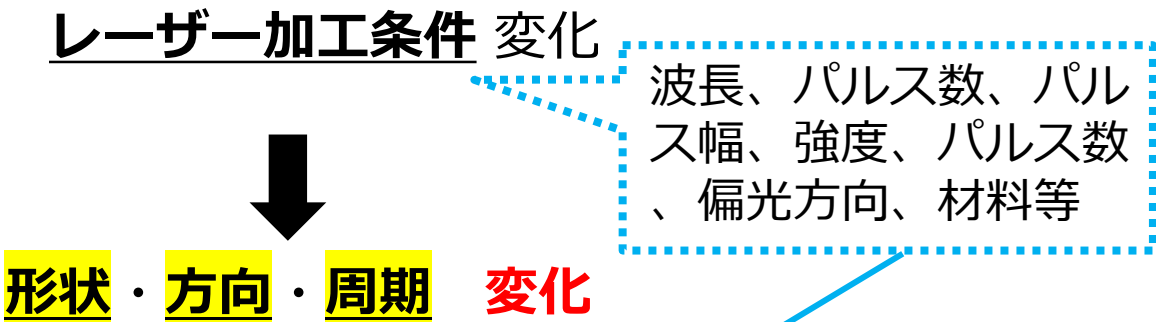
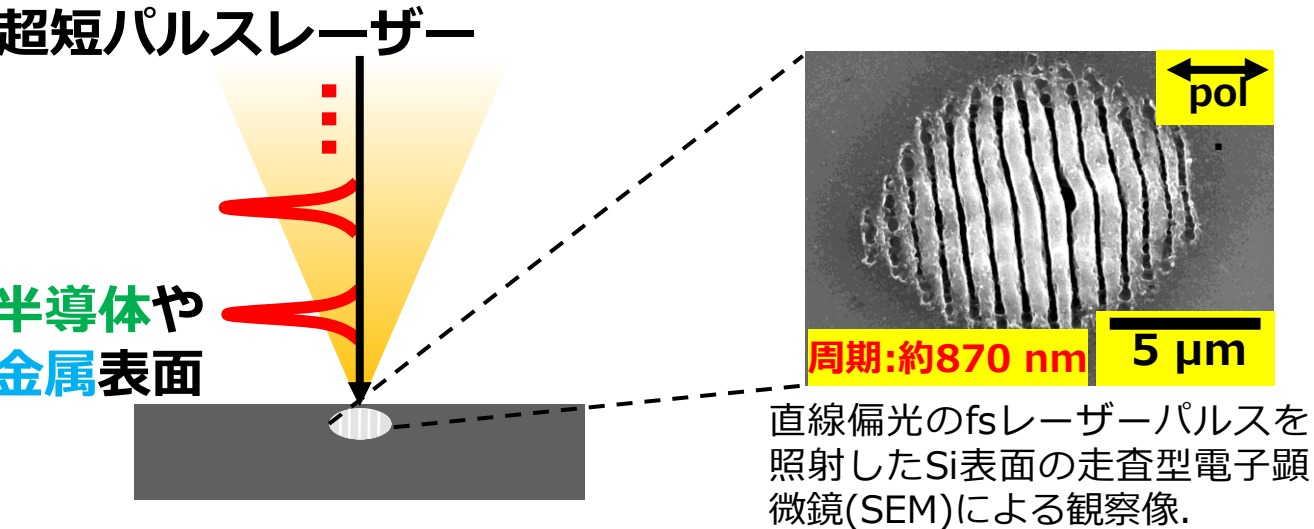
- × 薬剤耐性菌の増加
- × 人体への影響
- × 持続性

物理的（ナノ構造作製等）

- ◎ 長期的な効果が期待できる
- ◎ 薬剤耐性菌へのリスクオフ
- ◎ 高い生体適合性

- × 作製難易度
- × 生産的スループット
- × 定量的評価

-レーザー生成ナノ構造(LIPSS)-



パルス数		強度		偏光
異なるパルス数のレーザーパルス照射によりSi表面に形成されるLIPSS.		異なる強度のレーザーパルス照射によりTi表面に形成されるLIPSS.		円偏光のレーザーパルス照射によりTi表面に形成されるドット状LIPSS.

工学的利点

パルスレーザー光を照射し、物質と光の相互作用を利用することで、
多様な固体材料表面をナノ構造化できる

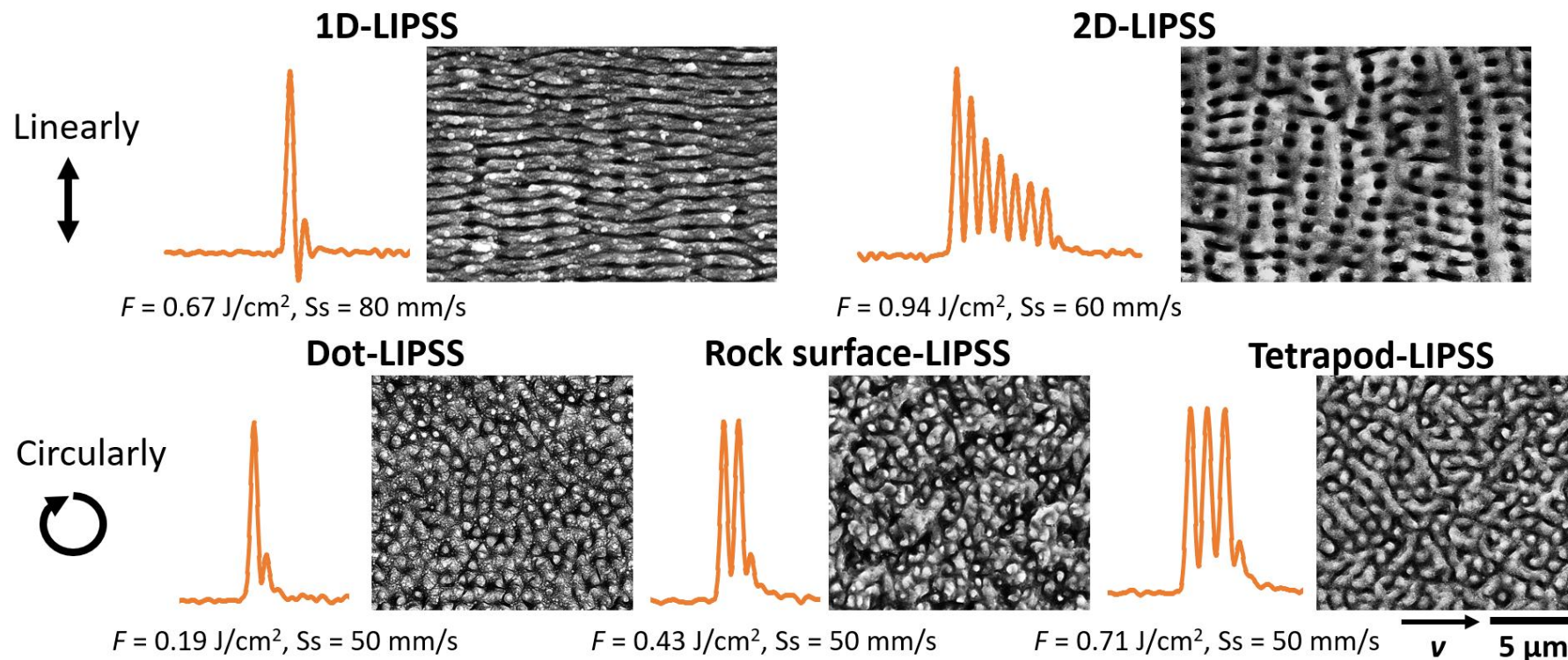
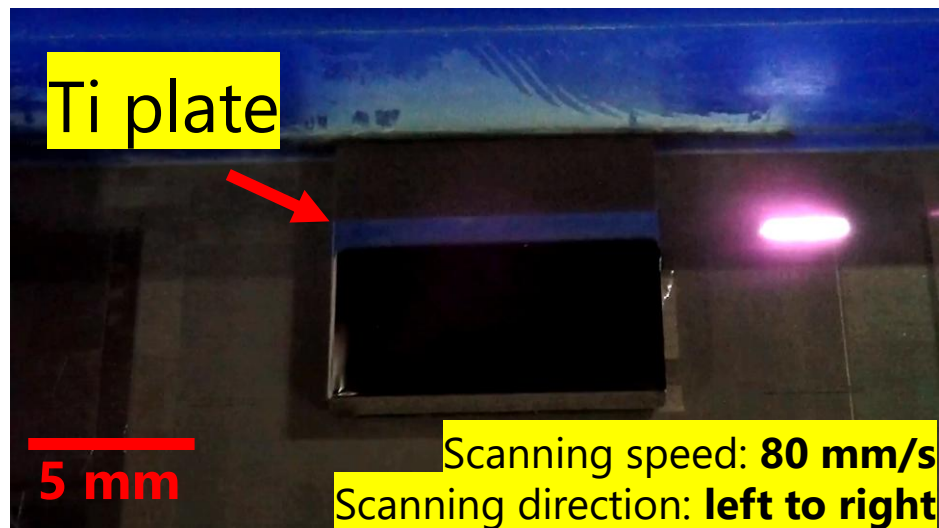
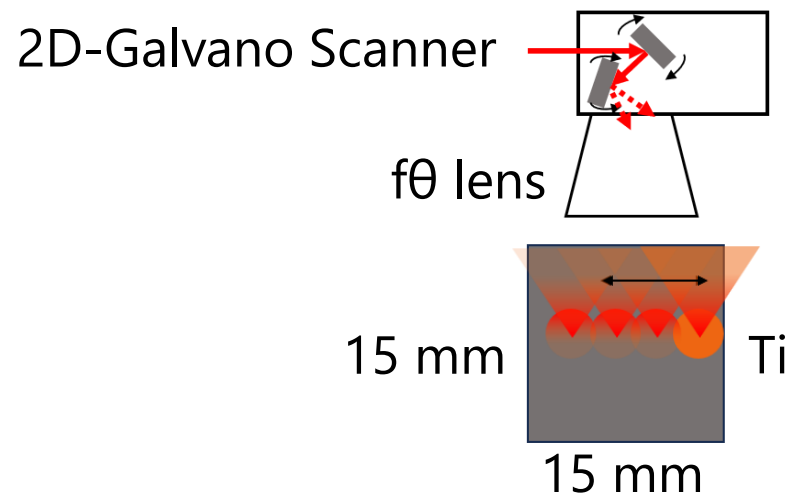
-微細構造の作成方法の比較-

	イオンビーム 電子ビーム	ソフトグラフィ・ インプリント加工	半導体プロセス (フォトリソグラフィ)	レーザー照射に よるLIPSS加工
加工精度	◎	○	◎	○
プロセスの容易さ	△	◎	×	◎
低環境負荷	○	×	×	◎
加工の種類	○	×	△	◎
スループット	△	◎	○	○

レーザー加工の優位点

光照射のみの容易な加工プロセス、低環境負荷、高い加工自由度

-多様なナノ構造の作製-



最大20 mm角基板に作製可能

光と物質との相互作用を利用した多様なナノ構造作製手法を確立 [1-3]
(これまでは、縞状・ドット状のみ)

[1] S. Kawabata, et al.: *Int. J. Extreme Manuf.*, **5**(1), 015004 (2023). [2] S. Kawabata, et al.: *Front. Nanotech.*, **5**, 1267284 (2023).

[3] S. Kawabata, et al.: *Appl. Surf. Sci.*, **submitted** (2026).

- (従来の課題) ソフト材料表面へのLIPSS形成 -

歪曲性、高い生体親和性といった汎用性の高い特性を持つソフト材料
(ポリマー、培地等)



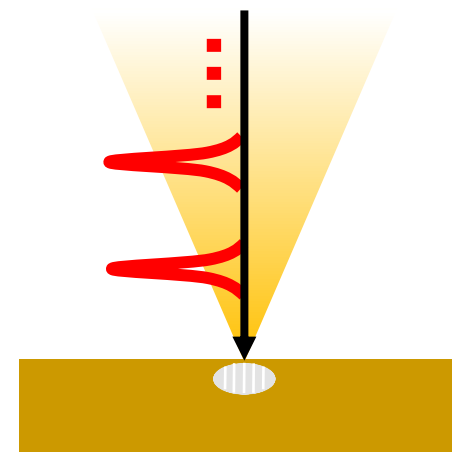
ポリマーフィルム



シリコーンゴム



超短パルスレーザー



➡ 熱影響が大きいため、大面積に微細構造 (LIPSS) を再現性高く作製することが難しい。

再現性高く、大きな領域にLIPSSを形成するには半導体や金属表面が最適

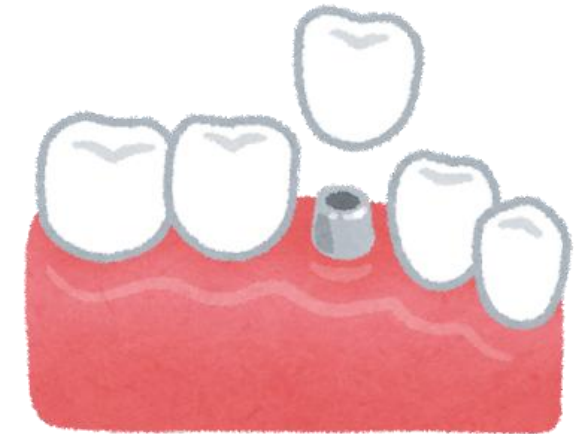
-微細表面凹凸構造を使った生物制御-

これまで凹凸構造を用いた生物制御の多くは数 μm 以上のパターンサイズ

➡ 周期サイズがsub- μm のLIPSSを応用することで、生物学的課題解決や新しい知見が期待できる

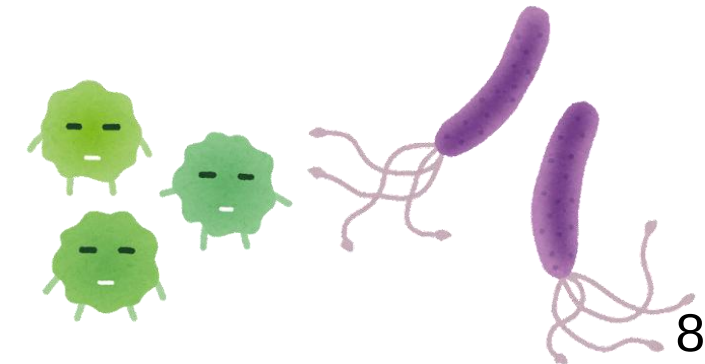
➤ 動物(幹)細胞の制御

- 臓器作製やモデルデバイスへの応用
→ in vivo、in vitroの両方で細胞の配向性制御が必要
- インプラント材料の高機能化
→ 骨芽細胞と部材の接着成功率向上、骨芽細胞の分化促進



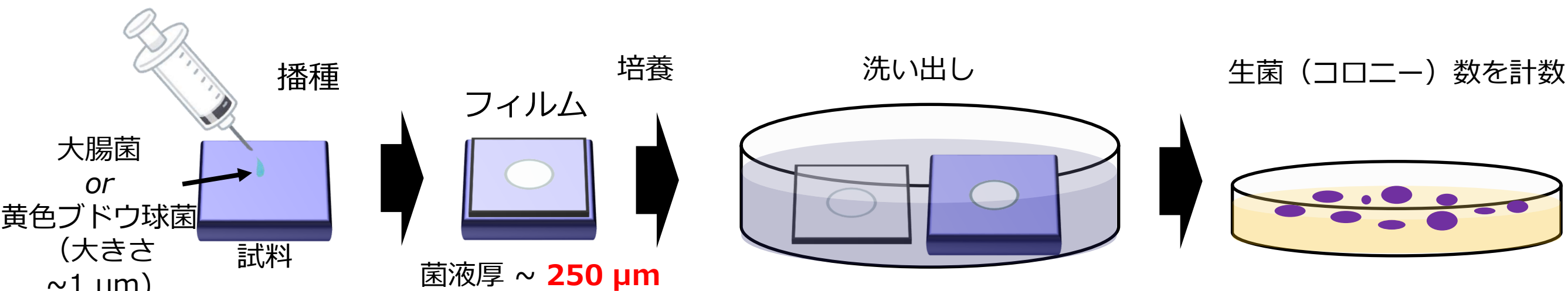
➤ 微生物(菌)の培養制御

- 易培養微生物の抑制による難培養微生物発見の容易化
→ 化学物質や抗生物質を使わない抗菌表面の実現
- 微生物の表面形状に対する応答および培養制御のメカニズムの解明



- (従来手法) ISOやJIS規格による抗菌性試験 -

従来方法: JIS Z 2801:2010 (ISO 22196:2007) 「抗菌加工製品—抗菌性試験方法・抗菌効果」



→主に**バルク液層**で菌増殖、主に**化学的効果由来の抗菌効果**を評価

材料表面が持つ**化学的抗菌性**（例：光触媒効果）と、
表面形状による**物理的抗菌効果**との切り分けが**困難**

-背景のまとめ-

抗菌性

- （ニーズ）微細表面構造による物理的な抗菌効果が注目されている。
- （課題）既存の抗菌評価手法は、表面の物理的効果由来の抗菌効果を評価することが難しい。

表面構造作製

- （加工手法）ナノオーダーの微細構造を作製する手法として超短パルスレーザー光照射によるLIPSS形成技術が有用。
- （課題）LIPSS形成は柔らかいソフト材料に対して、再現性高く作製することが難しい。

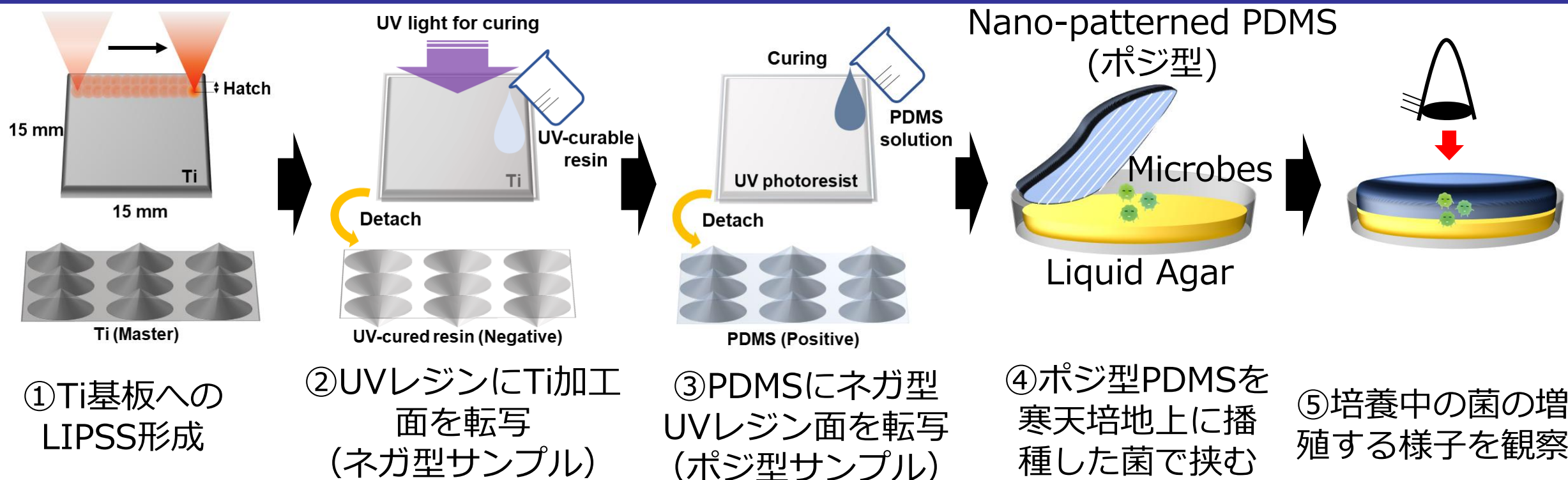
学術的

サブミクロン~ナノサイズの表面形状による生物制御に関する試みが少ない。

-物理表面形状による抗菌性評価手法-

今回開発した
技術および手法

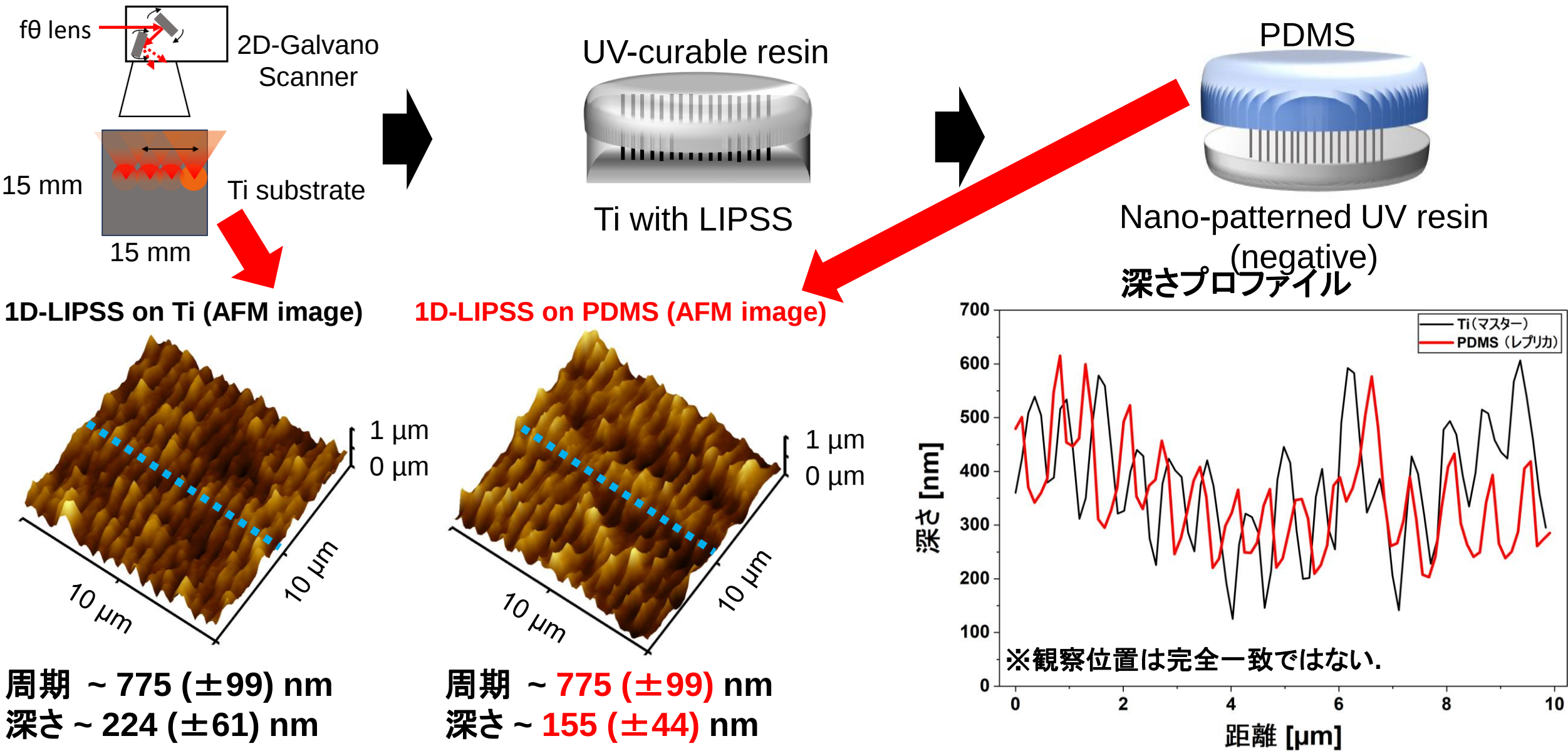
- ① ナノ構造をソフト材料表面に高精度に転写する技術
- ② 物理的表面形状による抗菌性を評価する手法



利点

- ソフト材料表面に**ナノオーダー**の微細構造を**大面積に作製**可能。
- 生体親和性の高い材料を用いることで、**化学的な影響を抑制**して評価可能。
- 微生物が対象表面で挟まれる空間を**最小限**にするため、**物理的表面形状による効果を強調**して、評価可能。
- 転写材料が透明なため、**増殖挙動の経時変化**を捉えることができる

-転写技術の精度評価-



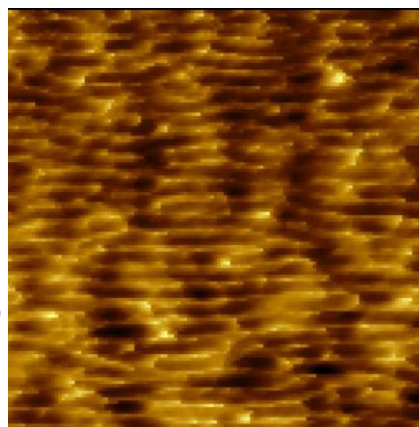
-マスター基板と比較したPDMS側の転写精度-

深さ:

155 (± 44) nm

(マスターと比較して) $\sim 70\%$

1D-LIPSS



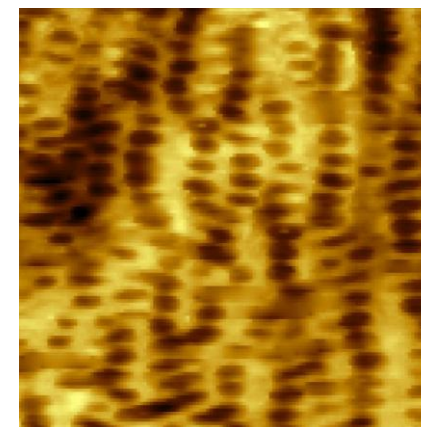
↑方向:

156 (± 36) nm $\sim 82.3\%$

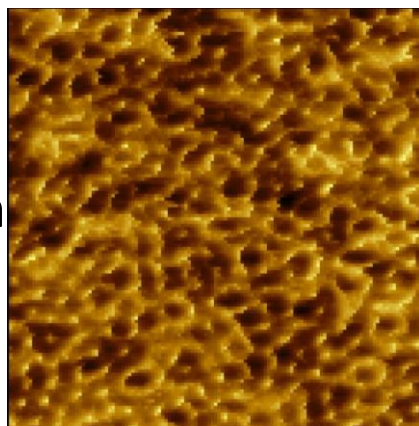
↔方向:

285 (± 76) nm $\sim 94.1\%$

2D-LIPSS



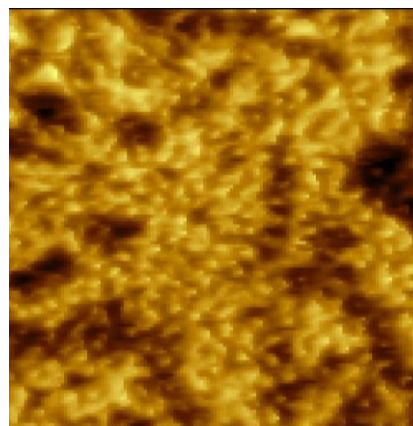
Dot-LIPSS



192 (± 43) nm

$\sim 87.9\%$

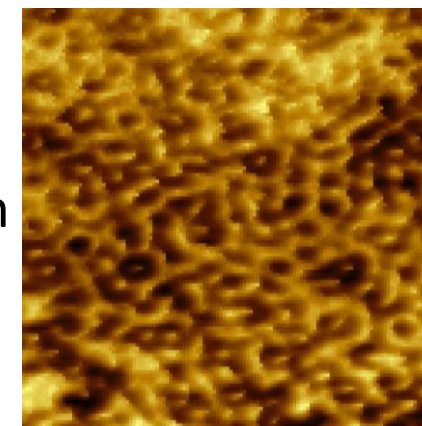
Rock surface-LIPSS



153 (± 44) nm

$\sim 84.6\%$

Tetrapod-LIPSS



151 (± 42) nm

$\sim 82.7\%$

5 μm

AFM像より各凹凸構造の深さを測定.

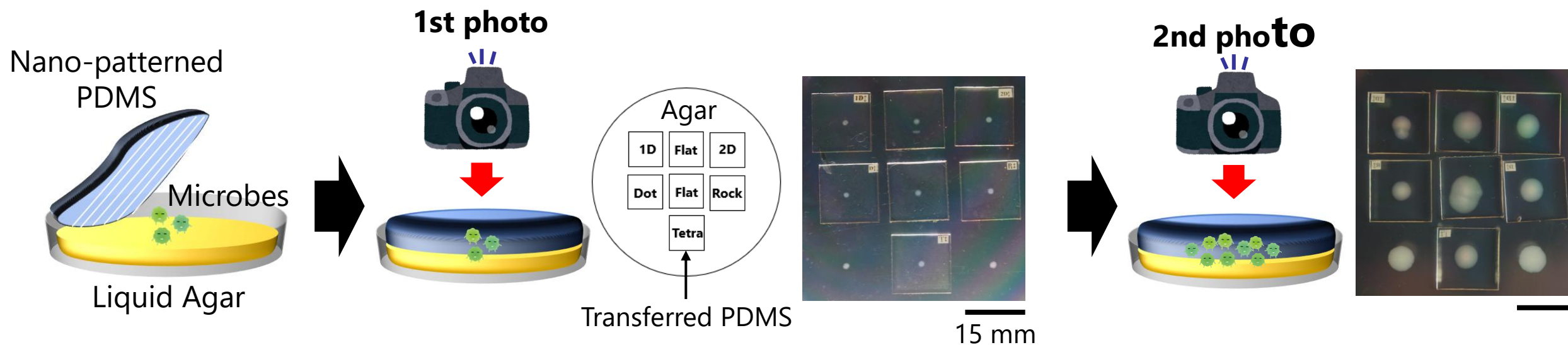
-具体的な評価の流れ-

播種微生物: 黄色ブドウ球菌 (*S. aureus*)、枯草菌 (*B. subtilis*)

使用培地: 1/4トリプトンソーヤ寒天培地 (Tryptone Soya Agar, TSA)

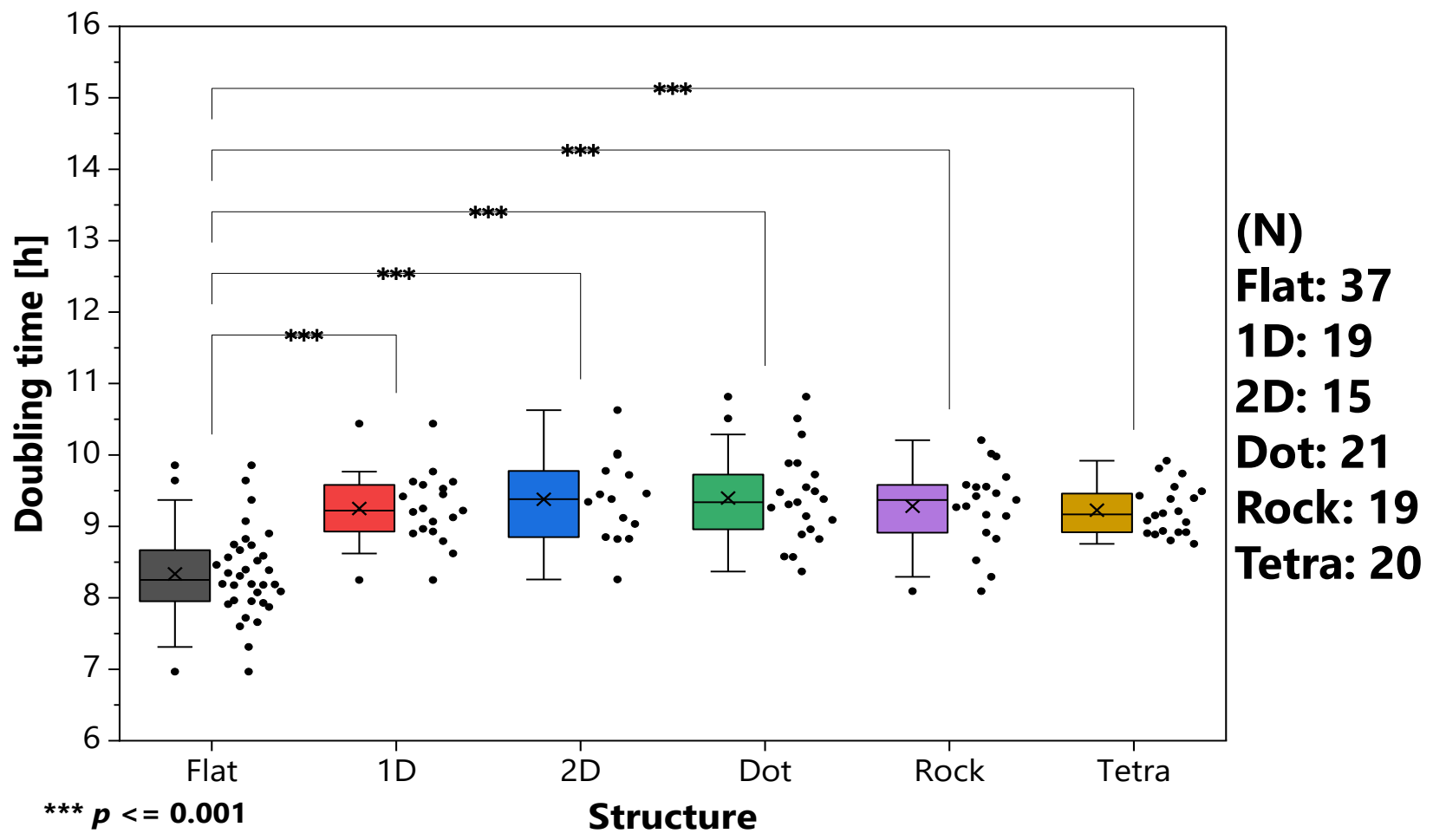
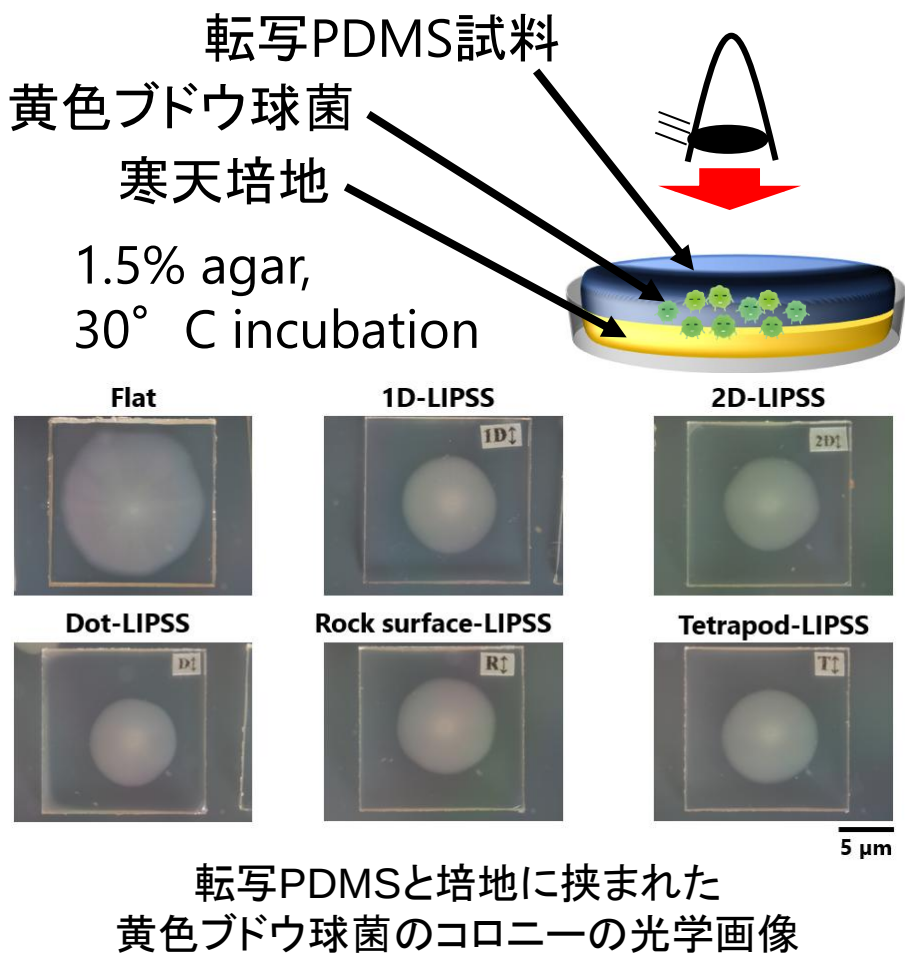
観察手法: 微生物が形成するコロニーをカメラで撮影

評価値: 倍加時間 (Doubling time) [h] (初期サイズからコロニーの大きさが2倍になるために要する時間)



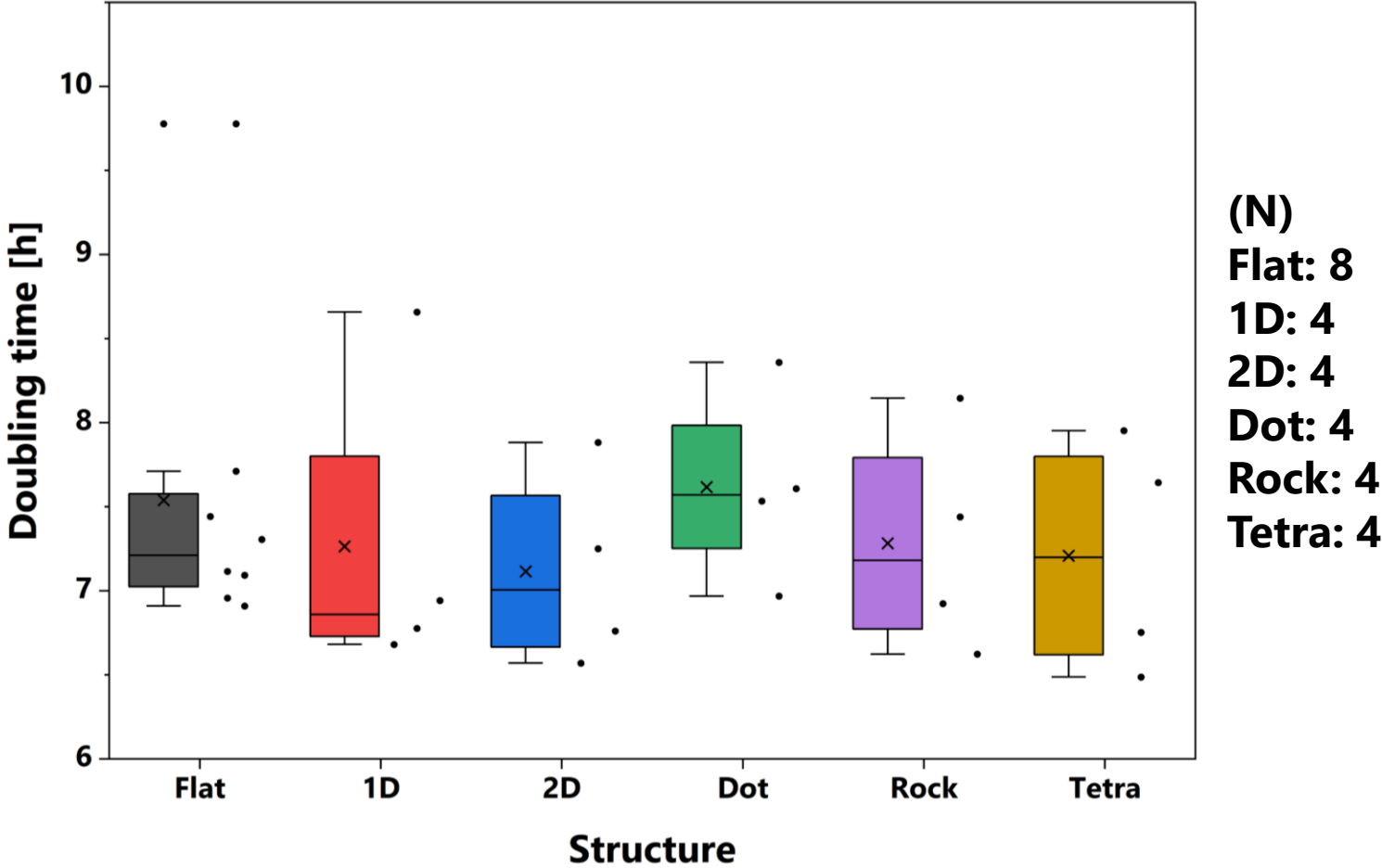
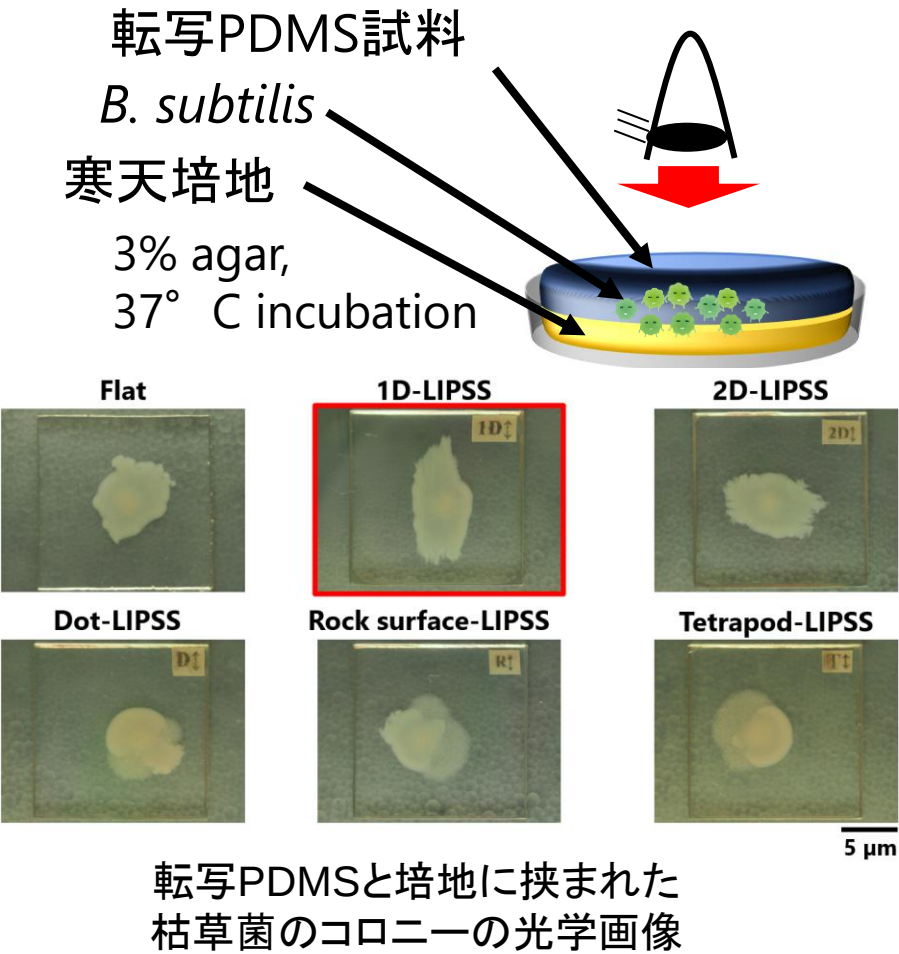
$$\text{倍加時間 [h]} = \ln(2) \div \left\{ \frac{\ln(\text{コロニー面積 at 2nd photos}) - \ln(\text{コロニー面積 at 1st photos})}{\text{経過時間 during 1st and 2nd photos [h]}} \right\}$$

-黄色ブドウ球菌が作るコロニーの統計的評価-



- ポジ型LIPSS構造が転写されたPDMSを用いた場合、平滑PDMS(Flat)と比較して、黄色ブドウ球菌の成長を有意に抑制した。

-枯草菌が作るコロニーの統計的評価-



- 枯草菌のコロニー形状は、LIPSS由来の構造の異方性と強い相関を示した。
(ポジ型1D-LIPSSを有するPDMSに挟まれたコロニーでは一方向に伸長する傾向が見られた.)

-新技術の特徴・従来技術との比較-

① ナノ構造をソフト材料表面に高精度に転写する技術

	ソフト材料に対するLIPSS形成 (レーザー光直接照射)	新手法
再現性	レーザー照射による熱影響や材料損傷により、安定した構造形成が難しい	母材の多様な表面形状を、深さ約80%の高い転写精度で再現可能
スループット	レーザー走査が必要なため、加工時間が長い	Roll-to-Rollプロセスにより高い量産性を実現可能

② 物理的表面形状による抗菌性を評価する手法

	JIS・ISO規格試験	新手法
対象表面との関連性	対象表面から離れた液相中で増殖 (主に化学的效果)	転写PDMS面と培地に挟まれた空間を 最小化 (主に表面構造の効果)
評価可能な指標	培養後の生菌数 (コロニー数)	コロニーの面積および形状

-考えられる応用例-

- これまで可視化が難しかった表面形状による微生物や菌の応答（増殖速度や形状）をより詳細に検証することができる
- 抗菌性ナノフレキシブルフィルムとしての医療用部材やバイオ関連材料の高機能化に繋がる応用展開が期待される。

実用化に向けた課題

- 表面凹凸構造に対する、微生物の増殖応答メカニズムが未解明。
➡メカニズム解明による効果的な抗菌性が期待できる。
- 作製したナノ構造転写PDMS表面の応用先が限定的であり、現在は微生物の増殖制御のみの適用に留まっているため、さらなる展開先の開拓が必要である。
(応用例：ウイルスor海洋生物制御、生物の付着性制御、表面反射率抑制、摩擦係数制御)

社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装への取り組みについて
現在	・転写手法および評価手法の再現性を確認 ・PDMSへの転写精度を評価 ・転写PDMS面に対する黄色ブドウ球菌、枯草菌の増殖応答を評価 ・転写手法および評価手法について国内特許出願	企業との連携による応用・および実用研究テーマの検討と実施
3年後	・表面凹凸構造に対する微生物の応答メカニズムについて体系化 ・評価手法について規格化 ・微生物以外の応用展開先の開拓	企業と連携してJSTのA-STEP等の研究開発費を獲得し、ユースケースに応じた最適構造の探索と殺菌効果の実証
5年後	・効果的な抗菌性発現に向けた微細構造の設計 ・実応用に向けた経時的or場面的な抗菌能の評価 (例:フレキシブル抗菌フィルムとして医療用部材や日用品への適用) ・Roll-to-Rollをベースとして量産プロセスの確立	サンプルワークの開始と大量生産技術の開発 公共の設備等への標準実装化を目指す

-企業への貢献、PRポイント-

- 本技術は薬剤を用いずに微生物の増殖や付着を物理的に制御できるため、耐性菌の発生リスクなく医療用部材やバイオ関連材料の高機能化を実現可能。
- 実応用を想定した研究開発（微細構造の周期・深さと転写精度の相関評価、菌液濃度や播種条件の最適化、細胞応答や抗菌性の定量評価等）を共同で行うことにより、実用化に向けた科学的な裏付けをより強固にすることが可能。
- 共同研究や技術指導を通じて、レーザー微細構造形成条件の最適化、転写プロセス設計、評価手法の標準化、量産化に向けたRoll-to-Rollプロセスへの展開など実応用に向けた製造プロセスの構築に貢献できる。

-本技術に関する知的財産権-

- 発明の名称① : 微細周期構造を形成する方法、及び表面に微細周期構造を有する部材
- 出願番号 : 2026-033479
- 出願人 : 理化学研究所
- 発明者 : 内山茂、川端祥太、磯島隆史

- 発明の名称② : 抗菌効果の評価方法、抗菌性部材及び微生物増殖制御方法
- 出願番号 : 2026-033480
- 出願人 : 理化学研究所
- 発明者 : 内山茂、川端祥太、磯島隆史

産学連携の経歴

文部科学省 光・量子フラッグシッププログラム
(Q-LEAP) 「次世代レーザー」
先端レーザーイノベーション拠点 (ALICe)
光量子科学によるものづくりCPS化拠点の委託事業成果

お問い合わせ先

株式会社理研イノベーション
ライセンス部

license-contact@innovation-riken.jp

TEL : 048-235-9308 (代表)