

文部科学省と国立大学附置研究所・センター 個別定例ランチミーティング

第63回 大阪大学 接合科学研究所 (2023.10.27)

12:05 – 12:10 (5分) : 研究所の概要
所 長 藤井 英俊

12:10 – 12:25 (15分) : 若手研究者からのプレゼン
「青色半導体レーザによる先進レーザ金属積層造形技術の開発」
レーザプロセス学分野 准教授 佐藤 雄二

12:25 – 12:45 (20分) : 質疑応答



文部科学省と国立大学附置研究所・センター 個別定例ランチミーティング

青色半導体レーザーによる 先進レーザー金属積層造形技術の開発

大阪大学 接合科学研究所
准教授 佐藤雄二

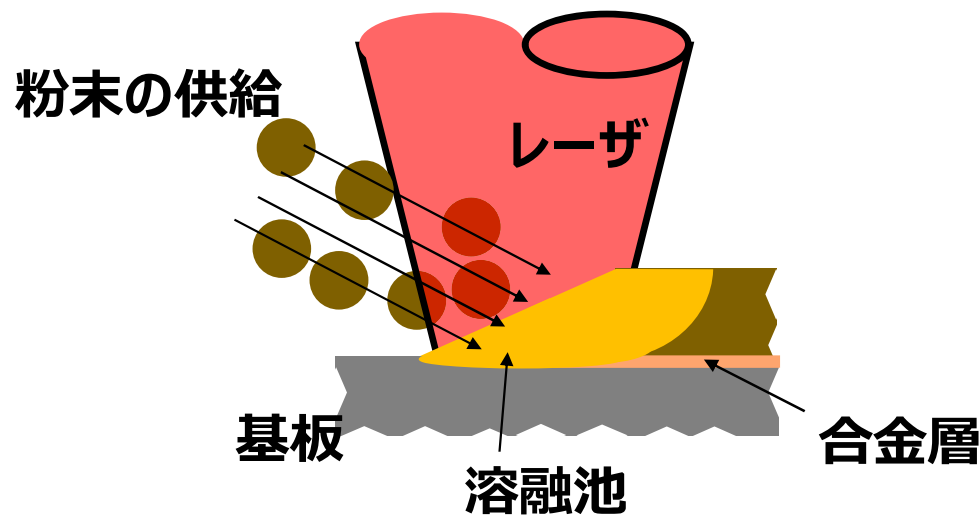
2023年10月27日 12:10～12:25

レーザー金属堆積法（LMD）とは・・・



レーザー金属堆積法（LMD）

熱源：レーザー



レーザーを材料粉末に照射

粉末をレーザーで溶融

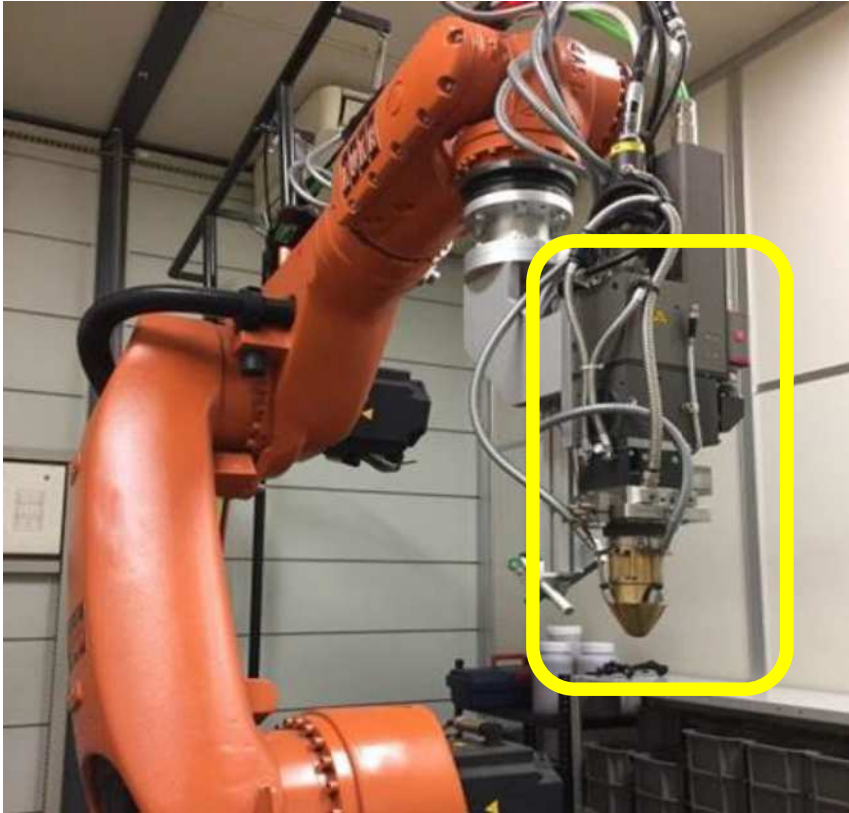
基板表面で材料粉末が凝固

皮膜を形成

特徴

- 緻密で密着性が高い皮膜の形成が可能
- 熱による影響が小さい
- 希釈による皮膜の性能低下が少ない

産業応用されているLMD法



レーザークラディングシステム

レーザー加工ヘッド

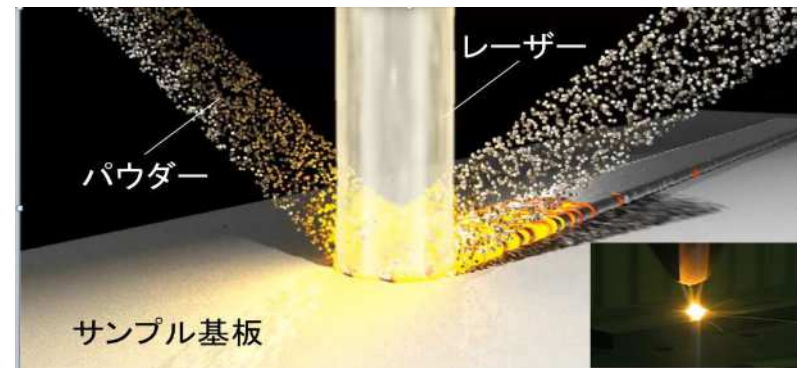


レーザー光源

ファイバレーザー
ディスクレーザー
半導体レーザー

大出力レーザー
(100W ~ 10 kW)

メリット：
コーティング面積が大きい！
施工速度が速い！





LAMで造形可能な材料

Ni系 (ニッケル合金)

- **インコネル**
(718, 738 等)
ニッケルを主体とし、クロム、鉄、炭素など様々な合金成分を添加することにより、耐熱性及び耐蝕性を高めたニッケル合金
- **ハステロイ**
ニッケルを主体とし、クロムやモリブデンなど様々な合金成分を添加することにより、耐食性及び耐熱性を高めたニッケル合金
- **コルモノイ**
耐食性に優れるNi-Cr合金にボロンやシリコンなどを加え硬いボウ化物や炭化物の分散によって耐摩耗性を向上
- **モネル合金**
ニッケル Ni62~70%, 銅 Cu30~35%, ほかに鉄, アルミニウム, マンガンなどを含む耐食合金。

etc.

Co系 (コバルト合金)

- **ステライト**
硬度が高く、耐摩耗性、耐食性、耐熱性、耐酸性に優れており、加えて1500℃~2000℃の高温においても、その特性はほとんど変化
- **トリバロイ合金**
(Co Bal Cr 31.5, Mo80, Si2.5, Fe 2.5)
- ステライト合金の耐摩耗性とハステロイ合金の耐食性を兼ね備えた材料です。モリブデン、クロム、シリコンをベースとした材料で温度領域で耐摩耗性に優れ、硬度も非常に高く摩擦係数も低い
- etc.

Fe系

- **低合金鋼**
合金成分(C, Mn, Cr, Ni, Mo, VとSiの組み合わせ)の含有率は10%未満
- **高合金鋼**
合金成分(C, Mn, Cr, Ni, Mo, VとSiの組み合わせ)の含有率は10%以上
- **高Cr鋳鉄**
Crを7%以上含むFe-Cr-C光本敬城鋳鉄
- **ステンレス鋼**
(316L, 410L 等)

非鉄系

- **チタン合金** (Ti6Al4V)
- **アルミニウム合金**
(Al-Si合金等)
- **タングステンカーバイト含有合金**
- **チタンカーバイト含有合金**

これらの材料の組み合わせがあり、コーティング・造形可能な材料は無数

LAMではCu系の造形は難しい



純銅の重要性

純銅: 熱伝導性/電気伝導性

	Cu	SS400	SUS 304
熱伝導率 (W/m・K)	403	60	16.7
低効率(nΩm)	16.9	197	72.0

用途

自動車用のコイルモータ、Li電池の電極、インバータなど



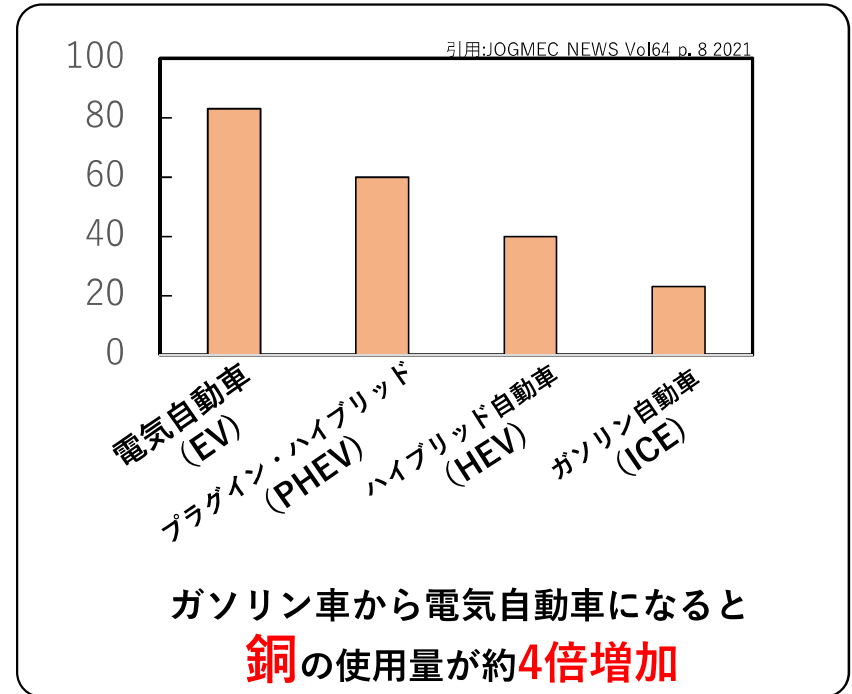
Ref: 古川電工
<https://www.furukawa.co.jp/fiber-laser/application/ev/battery/>

電気自動車用バッテリー



モータ

自動車1台あたりの銅の使用量 (kg)

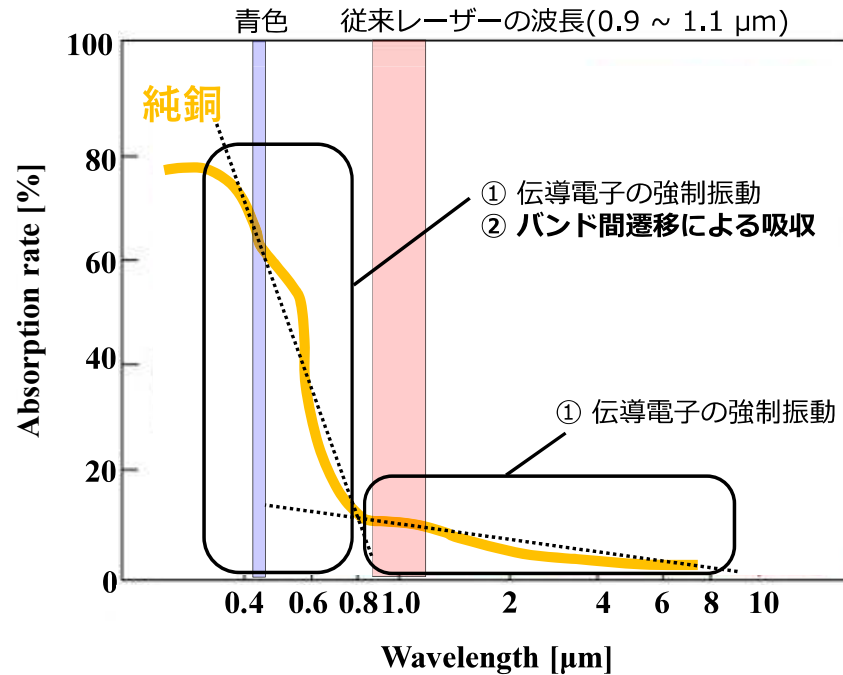


純銅は、カーボンニュートラル社会構築のキーマテリアル

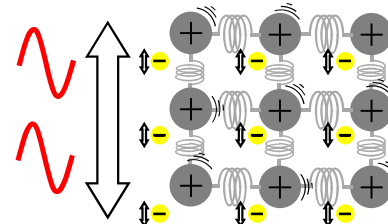


純銅に対する光吸収率

常温における純銅の光吸収率

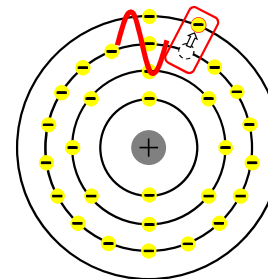


① 伝導電子の強制振動による吸収



伝導電子が光電場により強制振動
→ 原子核との相互作用によりエネルギーを授受

② バンド間遷移による吸収



3d→4p, 4s軌道へのバンド間遷移による光吸収

従来の近赤外線レーザー... 純銅に対する吸収率は10 %前後

→ 銅の3D造形はできなかった

青色半導体レーザー... 純銅に対する吸収率64 %と 近赤外線レーザーの約6倍

青色半導体レーザーにより効率的な純銅皮膜形成が可能に

世界最高輝度・青色半導体レーザーの開発と加工技術開発



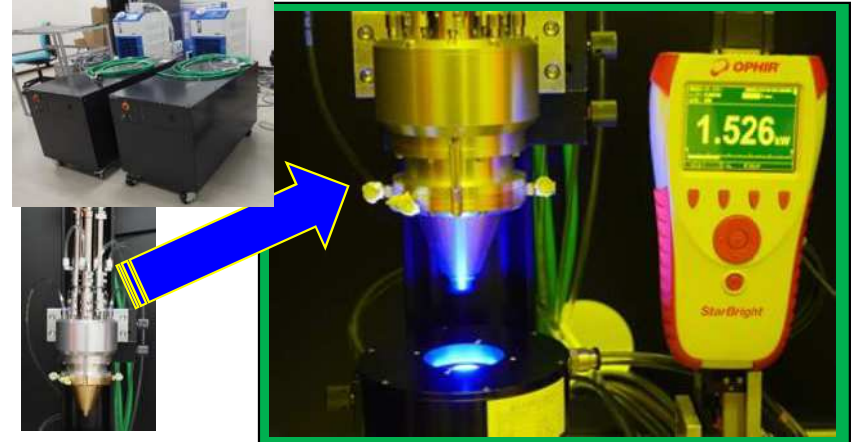
200W青色半導体レーザー



ファイバ端レーザーパワー密度：
 $2.6 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$

世界最高輝度

500W青色半導体レーザー



500W3台重畳した
マルチビーム加工ヘッド

1.5kW青色半導体レーザー集光ユニットの開発

加工技術

パウダーヘッド型 3Dプリンタ



青色半導体レーザー
マルチビーム型金属堆積装置の開発



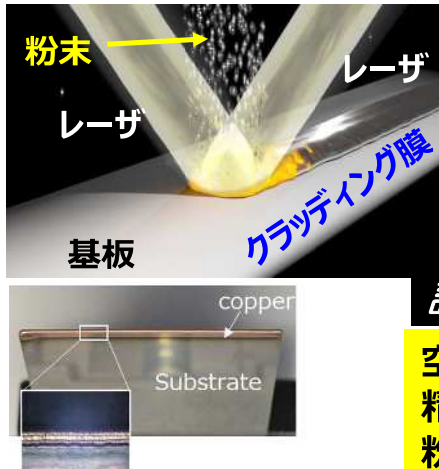
ハイブリッドレーザー
溶接システム





青色半導体レーザーを用いた マルチビーム式レーザー金属堆積法の開発

◇ レーザ金属堆積法 *Laser Metal Deposition :LMD*



粉末 → レーザ
レーザー
クラッディング膜
基板

- ① 金属粉末の供給とレーザーを照射
- ② 粉末の熔融凝固
- ③ 表面に皮膜形成

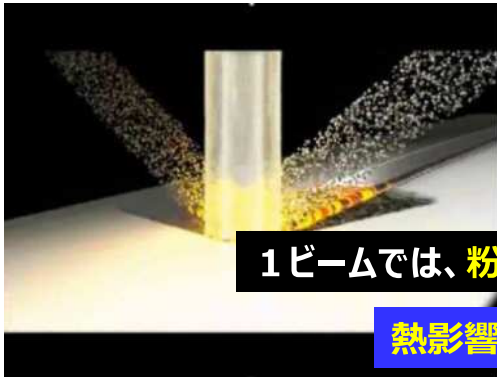
課題

空隙の発生
精度が低い
粉末の制御性が低い

従来技術（1ビーム）と新手法（マルチビーム）の優位性



◇ 1ビーム（従来技術）



1ビームでは、粉末の加熱が不均一

熱影響が大きいプロセス

◇ マルチビーム（新手法）

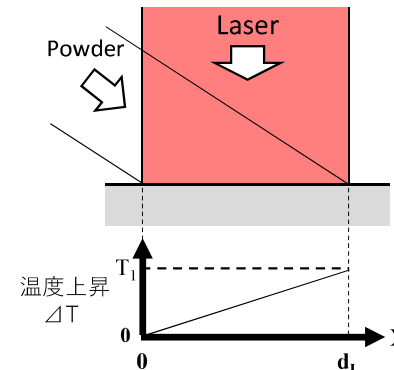


マルチビームでは、粉末の加熱が均一

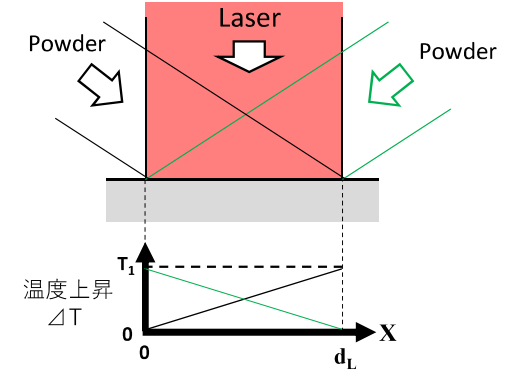
熱影響が小さいプロセス

精密・品質の高い皮膜形成

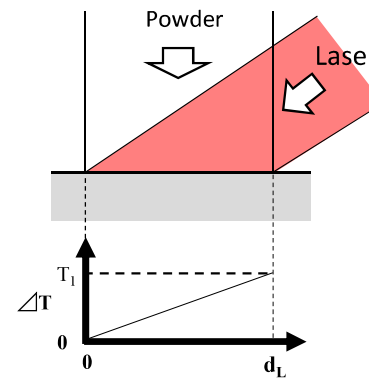
レーザーによる飛行粉末の加熱



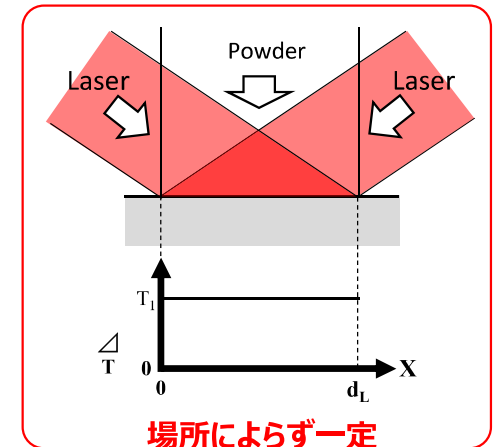
場所によって粉末の温度が異なる



粉末を2方向から供給しても粉末温度は異なる



1ビームだと、場所によって粉末の温度が異なる



場所によらず一定

粉末への均一な加熱によって高品質な皮膜が形成される

マルチビームLMDのレーザ本数と加熱領域の計算

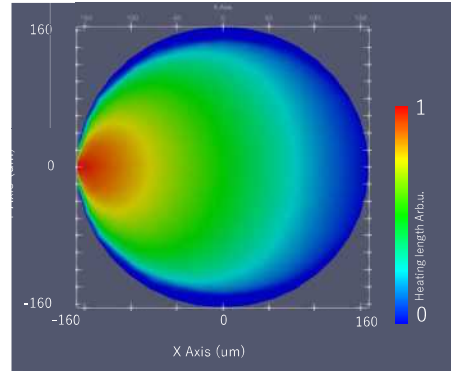


基板到達までの
粉末の上昇温度 ΔT

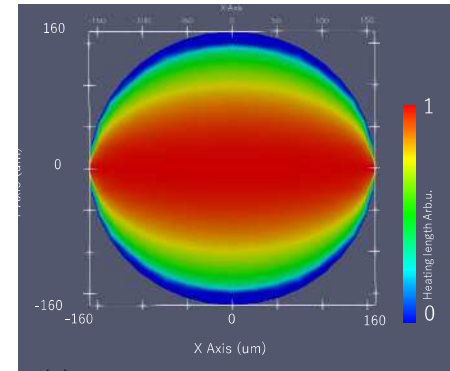
$$\Delta T = \alpha \cdot \frac{L}{v_p} \cdot \frac{I}{d_p}$$

α : 粉末の物性によって定まる定数,
 L : 相互作用距離,
 v_p : 粉末の速度,
 I : レーザパワー密度,
 d_p : 粉末直径

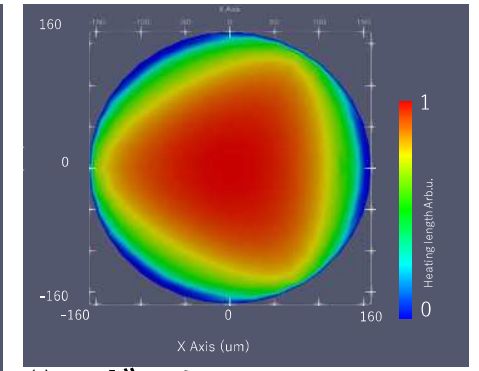
(a) 1ビーム



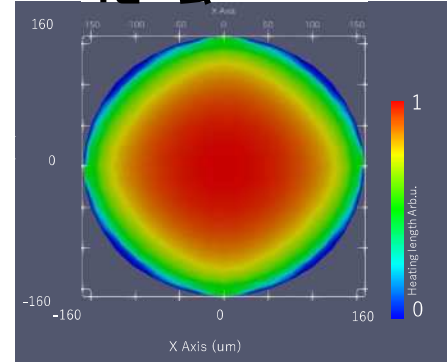
(b) 2ビーム



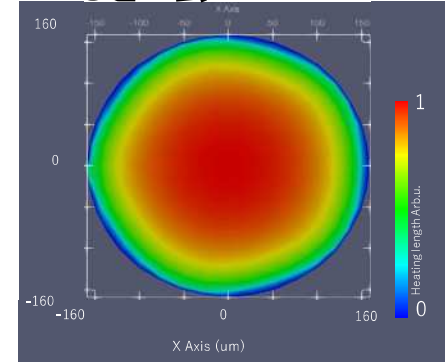
(c) 3ビーム



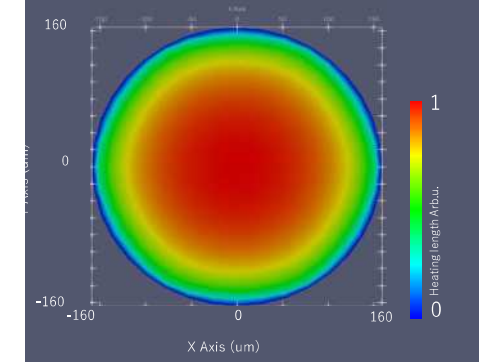
(d) 4ビーム



(e) 5ビーム



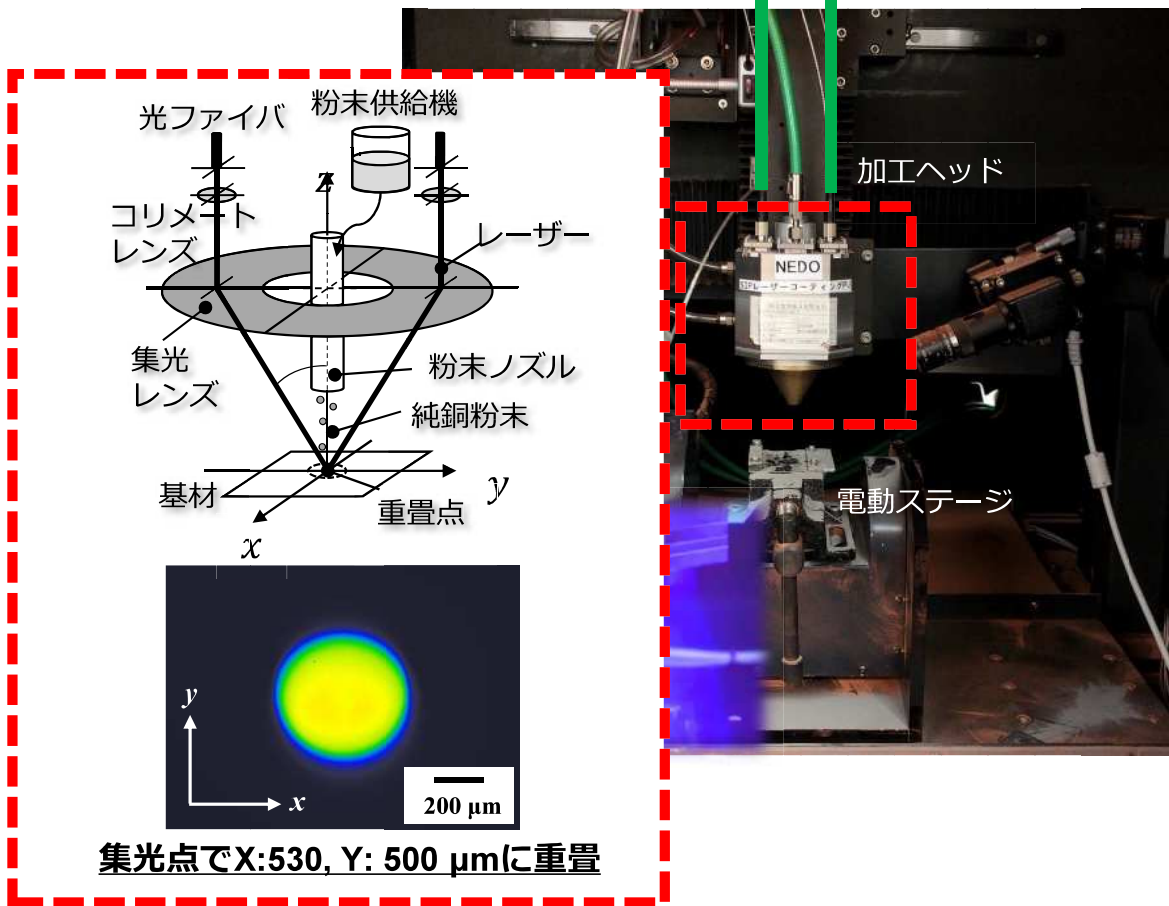
(f) 6ビーム



2ビーム照射が均一加熱領域が最も高い



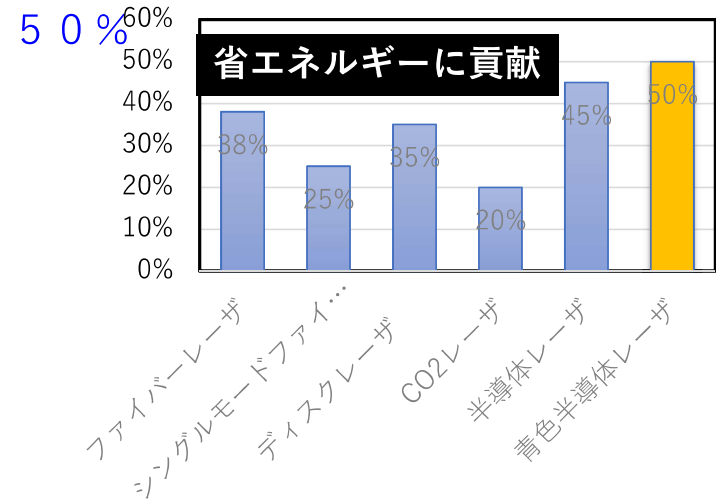
青色半導体レーザーを搭載したマルチビーム式金属造形装置の開発



青色半導体レーザー



①青色半導体レーザーの有効性の実証
青色レーザー：ウォールプラグ効率

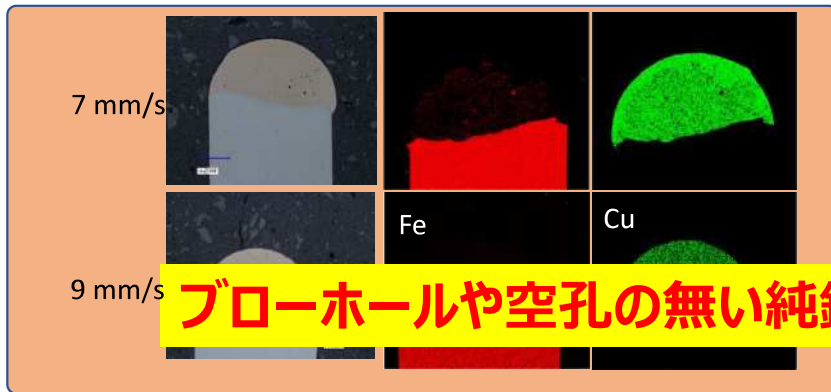
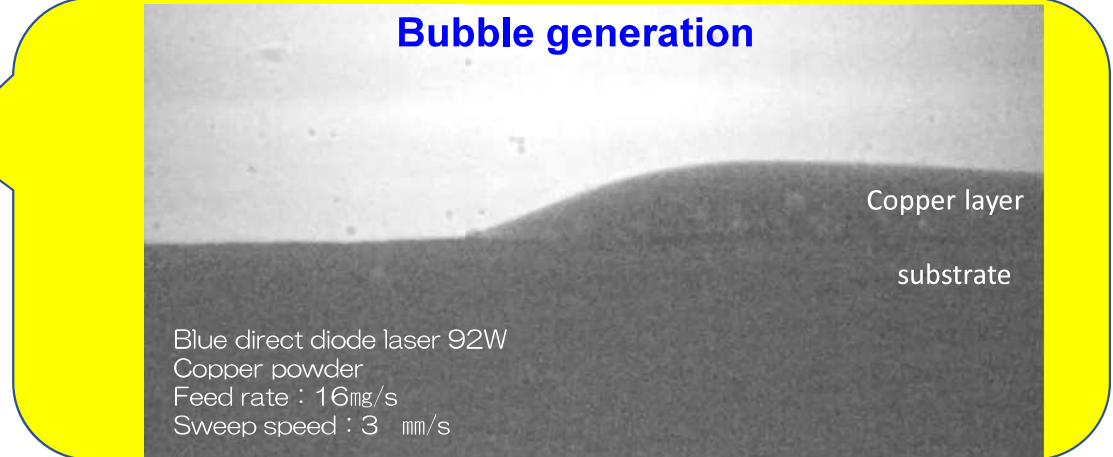
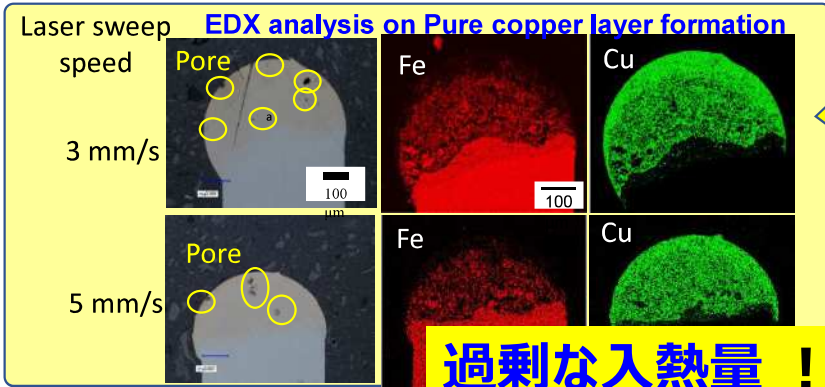


半導体レーザー：最大のウォールプラグ効率！

純銅皮膜の断面観察およびX線による皮膜形成過程の観察

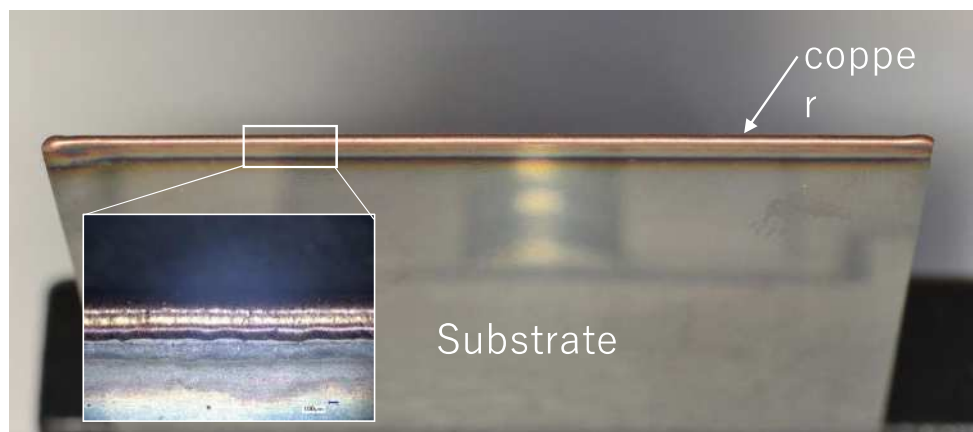
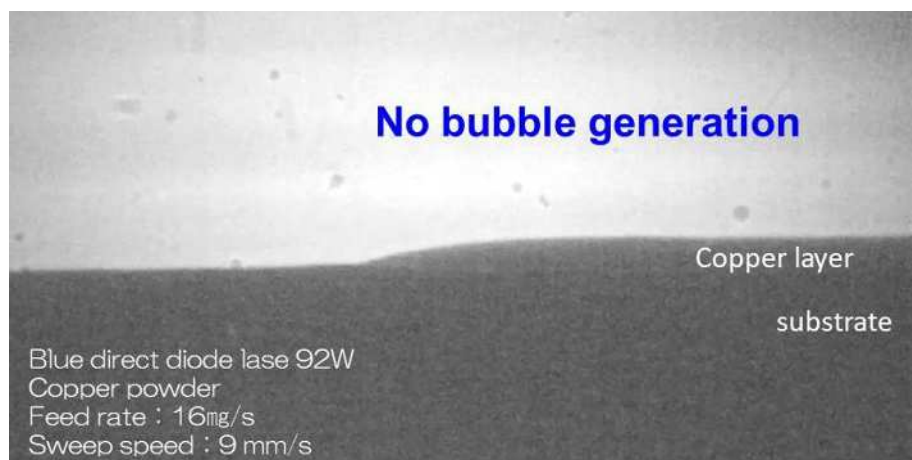


大型放射光施設SPring-8のX線による皮膜形成過程の観察

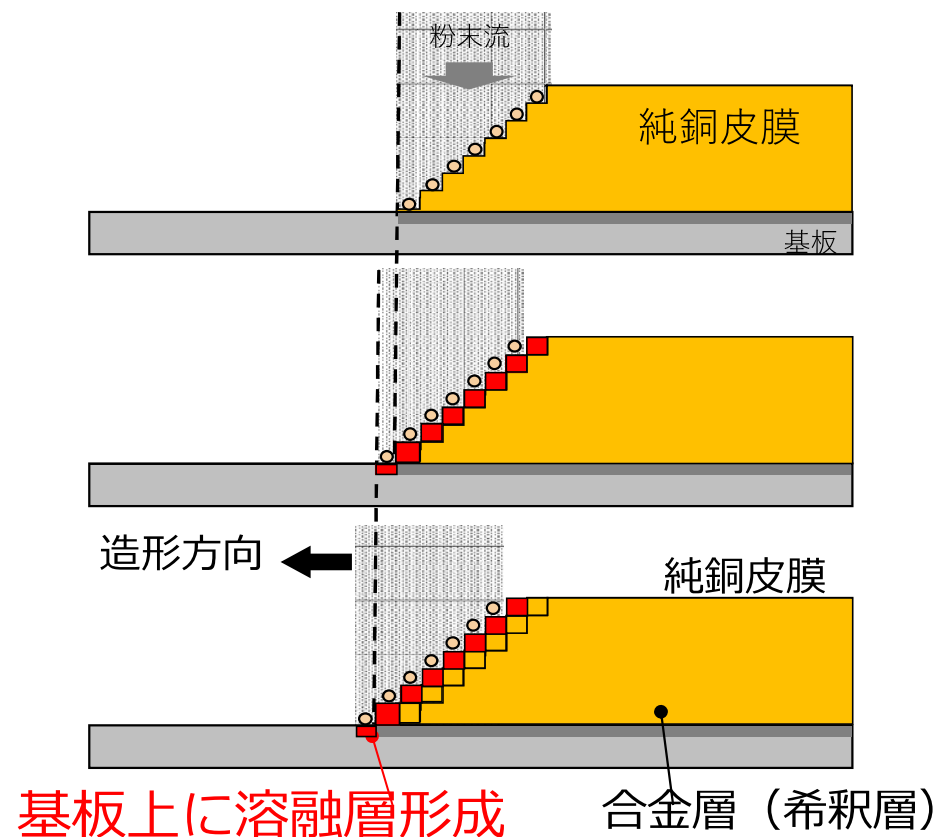


空孔が無く、緻密な皮膜を形成するには、レーザーの投入熱量の制御が重要

皮膜形成のメカニズムの解明と応用



0.5mm幅の基板に形成した純銅皮膜



レーザ金属堆積法を用いた金属表面への抗菌・ウイルス不活化作用を付与



純銅：**純銅は酸化して表面が黒色化** **商品価値の低下**

抗菌・ウイルス不活化作用・化学的変性が少ない機能性コーティング皮膜の開発が必須



化学的安定・抗菌・ウイルス不活化作用を有するコーティング皮膜の開発

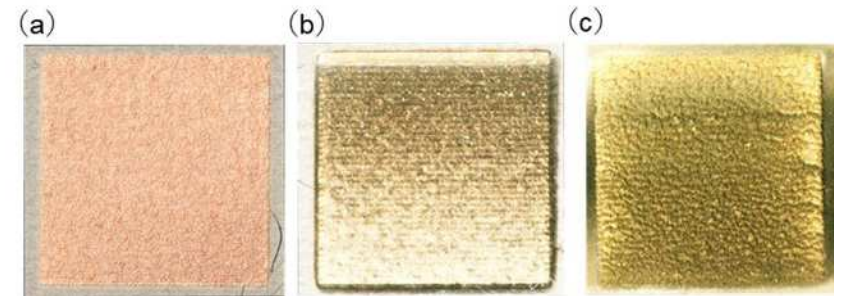
亜鉛添加量が増加すると溶融池の不安定性が上昇



精密な入熱制御

銅に**亜鉛**を添加した**Cu-Zn合金**皮膜の開発

JST A-STEPの成果



純銅皮膜

Zn:20%添加

Zn:30%添加



Zn20%添加銅合金皮膜の高速コーティング法を開発



抗ウイルステストを実施予定

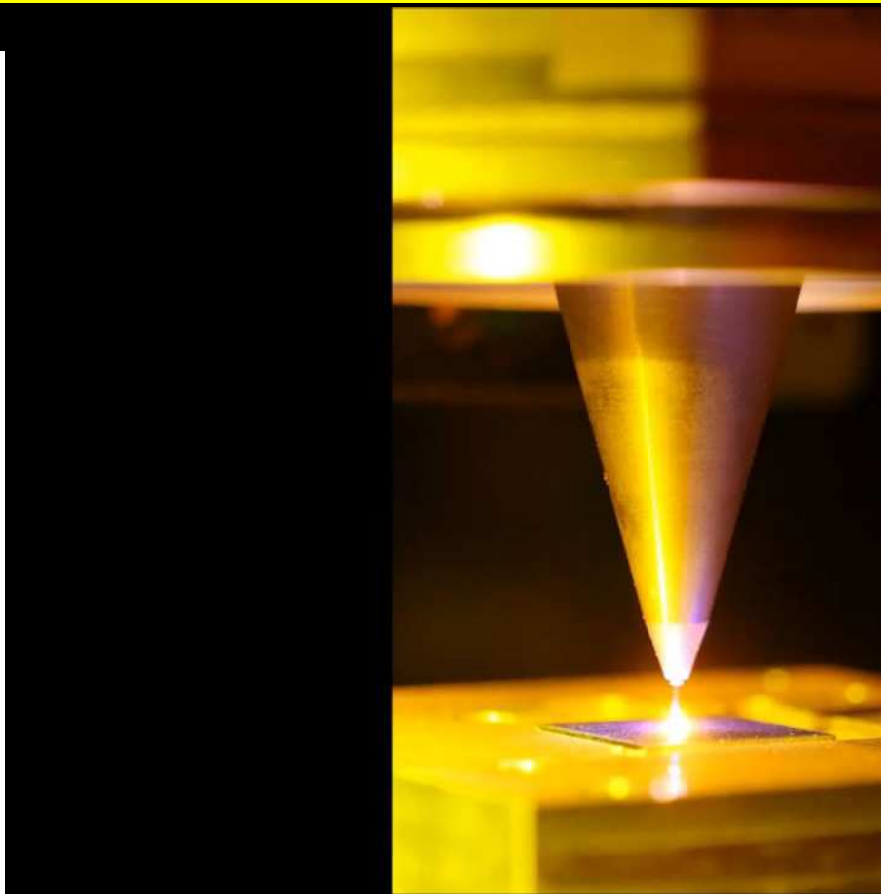


コーティング から 3D造形へ

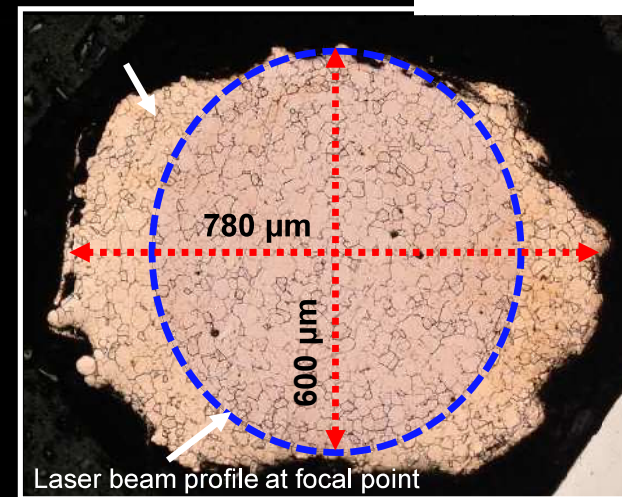
高速3D造形技術への展開



造形した純銅ロッド



ロッドの断面図



断面形状
X軸方向に長い楕円形

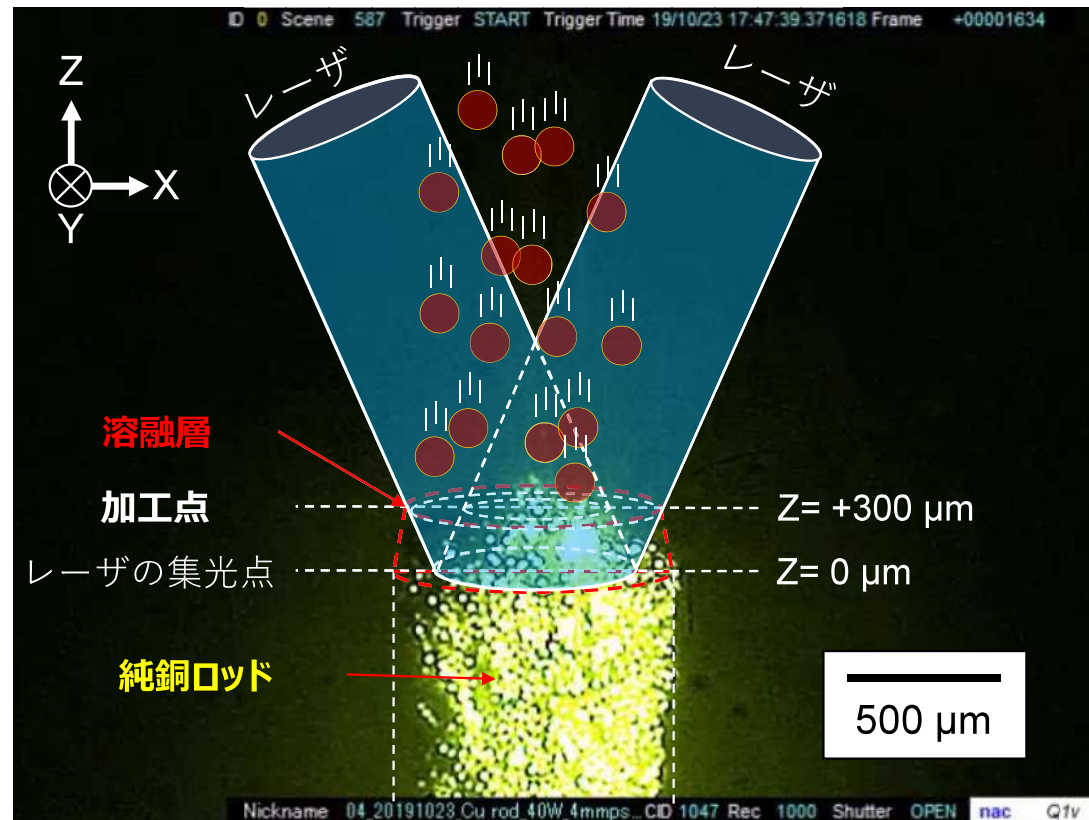
径
レーザーのスポット径
よりも大きい

青色半導体レーザーを用いて**純銅**細線を
形成する技術。**金**もできます！？

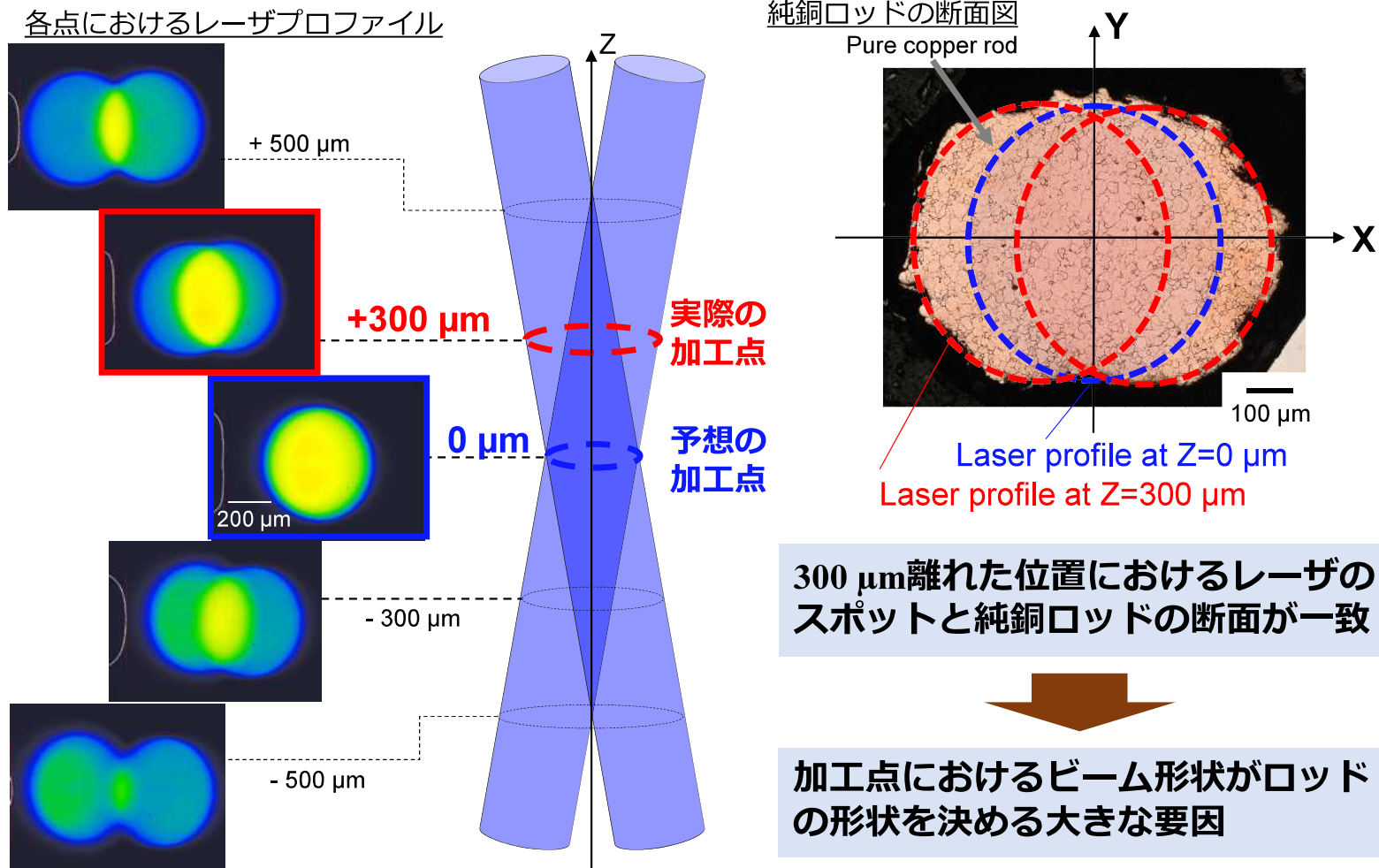
ハイスピードビデオカメラによる観察結果



レーザー出力：40W
上昇速度：4 mm/s
撮影速度：1000 fps



ロッドとレーザースポットの相関



3 Dロッドは、加工点でのレーザーのスポット径に依存した造形できることを示唆

まとめ



カーボンニュートラル社会実現のためのキーマテリアルとして純銅を挙げ、 開発した青色半導体レーザーを用いたレーザー金属堆積法を紹介した

- 高精度・低熱影響なLMDを実現する青色半導体レーザーを搭載したレーザー金属堆積装置を開発し、その有効性を実証した。
- 当該装置を用いてステンレス基板上に純銅皮膜を形成し、大腸菌による抗菌性評価を行った。その結果、コーティング皮膜においても抗菌性が保持されていることがわかった。
- 耐酸化性を向上させるために、銅-亜鉛合金粉末の開発に取り組み、80wt%Cu-20wt%Zn合金の皮膜形成することができた。
- 純銅の高速3D造形技術として、3Dロッド造形を行った。3Dロッドは、加工点でのレーザーのスポット径に依存した造形ができることを明らかにした。

謝辞

本研究は、国際・産学連携インヴァースイノベーション材料創出プロジェクト（DEJI²MAプロジェクト）
科学研究費補助金 基盤研究（C）、JST A-STEPトライアウト型、NEDO、アマダ財団の助成によるものです。

高出力青色半導体レーザーにおいては、日亜化学工業の援助を受けて開発致しました。



ご清聴頂きありがとうございました

sato.yuji.jwri@osaka-u.ac.jp