

微細構造を有する粉末積層造形インプラントの真空加熱による強化

川崎 彰太*, 新田 勇**, 月山 陽介**

*新潟大学大学院自然科学研究科材料システム専攻

**新潟大学工学部機械システム工学科

概要

複雑な内部形状を有する三次元構造体が容易に造形できるため、レーザ積層造形法によるインプラントの製作が期待される。加えて、積層造形法の特徴を活かして、インプラントの人骨への早期固定性改善の要望も高い。

インプラントの早期固定性を改善するために、内部に微細な気孔を作り生体組織を侵入させることで内部にも骨の形成を促し、早期に生体骨と結合させる方法がある。小スポット径レーザは、レーザを微細に集光することで熱影響部、すなわち焼結範囲を微小領域に限定できる。また低出力であるため、焼結部周囲への熱溶融も抑えることができる。このことから、一般的な積層造形に用いられる高出力レーザよりも微細な形状を造形できる。しかし、粉末間のネック部のみを焼結するため、負荷を受けた際にネック部だけに荷重が集中して所望の強度が得られない問題があった。そこで、本研究では小スポット径レーザを用いて純チタン粉末から造形物を作製し、真空加熱を施すことで粉末同士の焼結を促進し、ネック部の強度を高めることで造形物強度を生体骨に近づけることを試みた。

1. 研究背景

●人工骨

高齢化社会の進展により骨粗しょう症患者が増加し、骨折などの治療に用いられる人工骨が注目されている。

生体材料を用いた人工骨の特徴

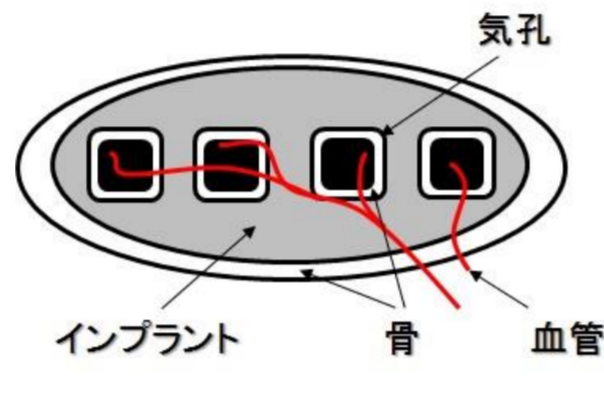
- 自家骨と直接結合し、体内に異物を残さない
- 強度が低い

金属材料を用いた人工骨の特徴

- 強度が高く、荷重のかかる骨に代用可能
- 骨と直接結合しない、固定に時間がかかる

荷重を受ける部位にも利用可能で、早期に骨と結合する人工骨を開発する

内部に気孔を造ることで、結合面積を増やし早期の固定を実現する。



粉末積層造形法による微細な造形と焼結物の高強度化を目指す。

2. 実験手法

●焼結物の評価

粉末積層造形法

レーザの照射条件の最適化と真空加熱による強度の向上を試みる。レーザ加工装置を用いて焼結物を作製し、高周波誘導炉による真空加熱後に圧縮試験を行い、焼結物の強度の評価を行う。

粉末は最大粒径38 μm の純チタン粉末を使用し、焦点距離でスポット径が約30-60 μm のレーザ加工装置を使用して焼結を行った。真空加熱では焼結物のサイズが小さく単体では加熱できないため、図のようなチタン製の土台を製作し、焼結物の加熱を行った。圧縮試験では負荷と除荷を繰り返しながら行い、除荷時の傾きからヤング率を算出した。

3. 実験結果

●レーザ焼結条件及び圧縮試験結果

レーザ加工装置を用いて純チタン粉末を焼結し、積層方向に貫通孔を有する焼結物を作製した。製作した焼結物の外観を図1に示す。実験により焼結物の強度及び貫通孔の形状を高精度に造形できるレーザ照射条件を選択した。図2にレーザ出力による貫通孔形状の変化を示す。レーザ出力の増加に伴い、同じ照射パターンでも造形される貫通孔の形状が変化した。粉末の積層厚さの変化による強度の変化を図3に示す。積層厚さの減少に比例して焼結物の強度が向上することが分かった。しかし得られた強度はどの条件でも純チタン本来の強度に達しなかった。これは、レーザ焼結による粒の溶融が不完全であるために粉末粒が部分的に結合し、結合部に荷重の集中が起こったため強度が低い値になったと考えられる。結合部での荷重集中の概略図を図4に示す。

製作した焼結物に真空加熱を行った。真空加熱条件及びレーザ照射条件を表1に示す。真空加熱時間による0.2%耐力の比較を図5に示す。この条件では加熱時間0-5hで焼結物の強度向上が確認された。しかし、5-10hでは強度上昇はわずかな値にとどまった。真空加熱温度による0.2%耐力の比較を図6に示す。加熱温度1073Kでは非加熱の焼結物と強度の差は見られなかったが、純チタンの α - β 変態点以上の1223-1373Kでは強度の向上が確認された。しかし、1373-1573Kでは強度の上昇は見られなかった。真空加熱によるヤング率の変化を図7に示す。焼結物のヤング率は加熱時間及び加熱温度の変化によらずほぼ3-4.5GPaで一定の値となった。

表1. 実験条件

真空加熱条件					
加熱時間, h	0	1	5	10	
加熱温度, K	1373	1073	1223	1373	1573
真空度, Pa	0.04				
レーザ照射条件					
出力, W	6.8				
発振形態	CW				
積層厚さ, μm	50				
酸素濃度	0.10vol% 以下				

今回の実験では、加熱時間及び加熱温度に関わらず0.2%耐力は最大で30-40MPaとなり、生体骨の100-150MPaに届かなかった。この原因として、明確な弾性域を持たないことが挙げられる。図8に実際の強度評価に用いた応力ひずみ線図を示す。この図から負荷開始直後から塑性変形が始まっていることが分かる。これは粒の結合部毎に結合の度合いが異なるため、小さな荷重でも部分的に塑性変形が起こり、それ以外の結合部の弾性変形と同時に発生しているため明確な弾性域を持たないと考えられる。このことから、粒の充填率向上及び空隙の減少により更なる強度の向上が期待される。

真空加熱の前後で粒の結合部の変化を調べるためにレーザ顕微鏡を用いて観察を行った。取得した画像を図9に示す。この図から粒同士の結合部が増幅していることが分かる。このことから真空加熱により焼結物の強度の向上したのは、原子の拡散が原因と考えられる。原子拡散機構の概略図を図10に示す。

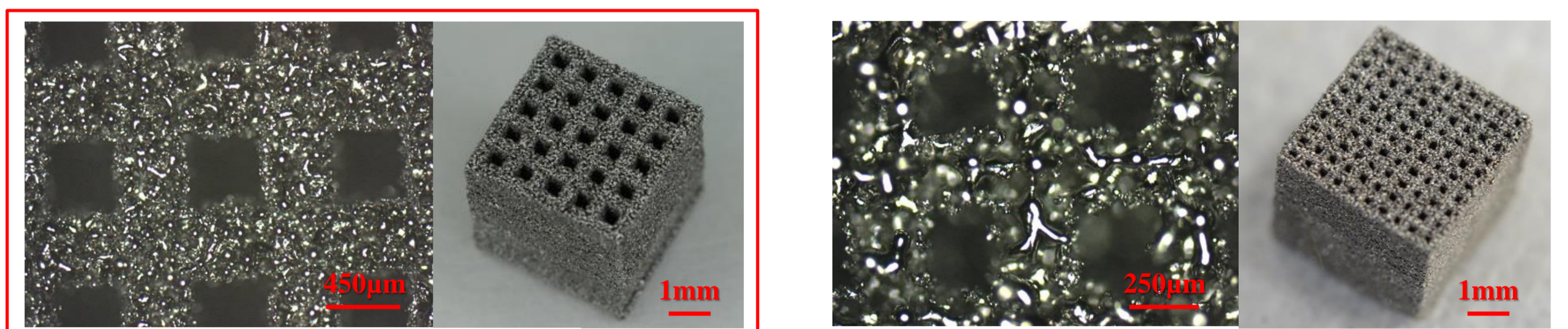


図1. 製作した焼結物外観

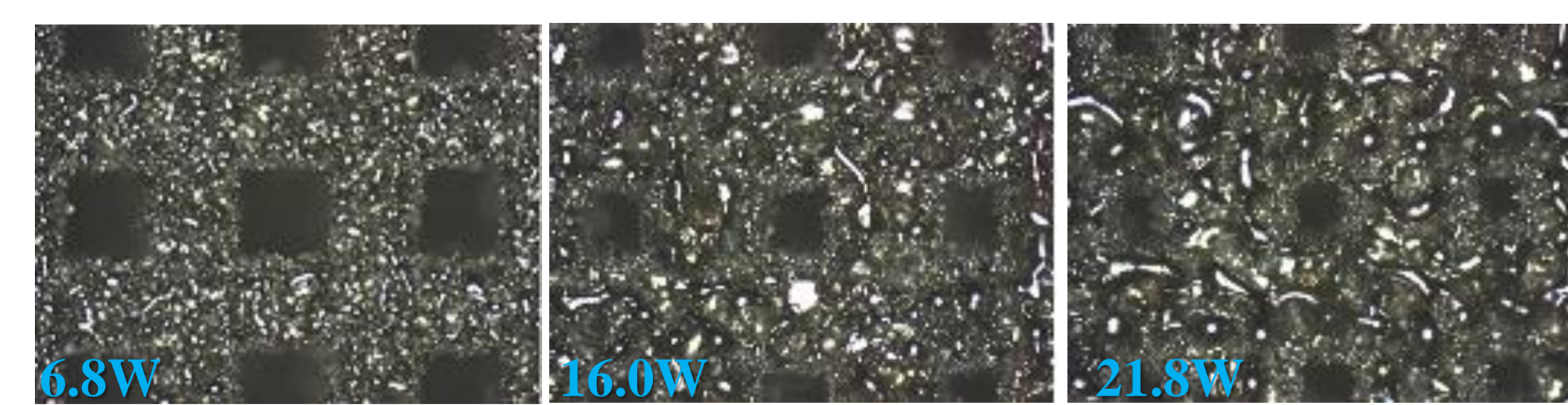


図2. レーザ出力による貫通孔形状の変化

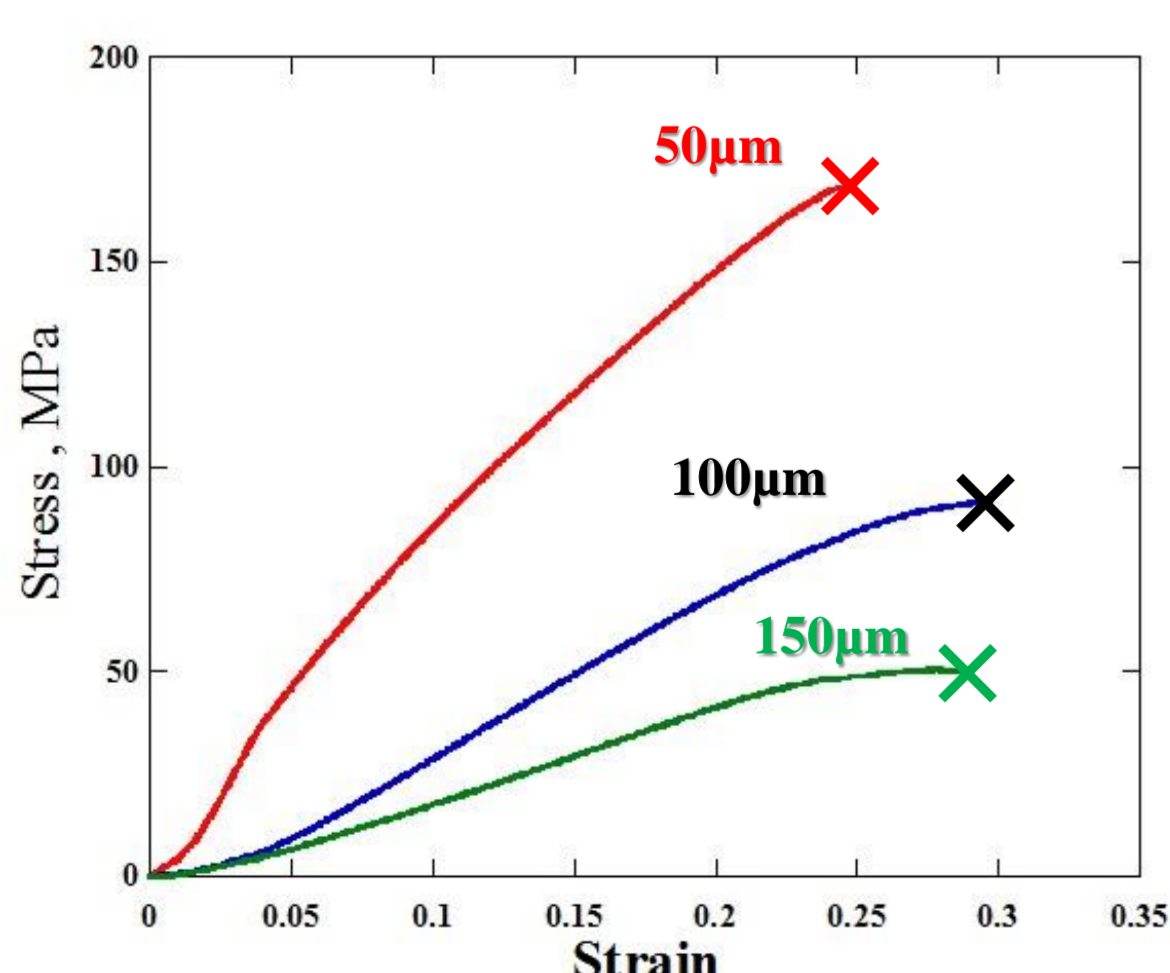


図3. 積層厚さの差による破断点の変化

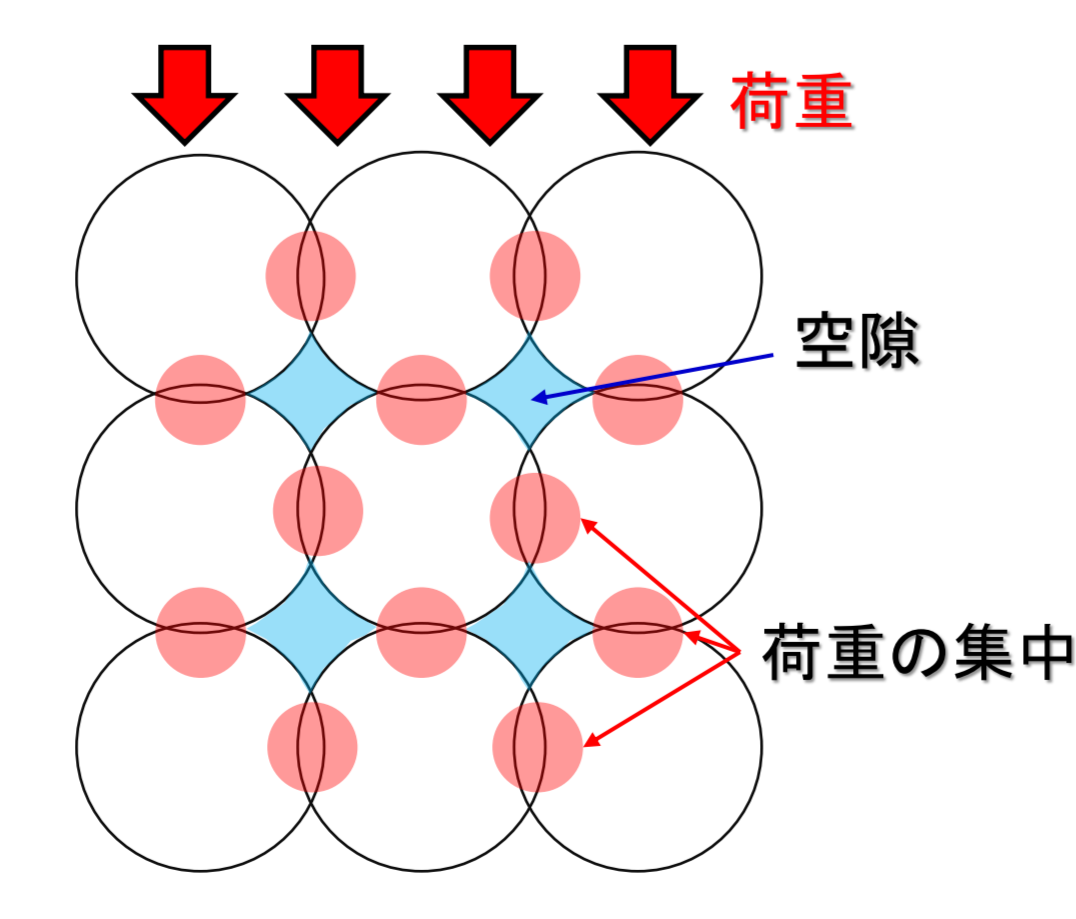


図4. 結合部での荷重集中の概略図

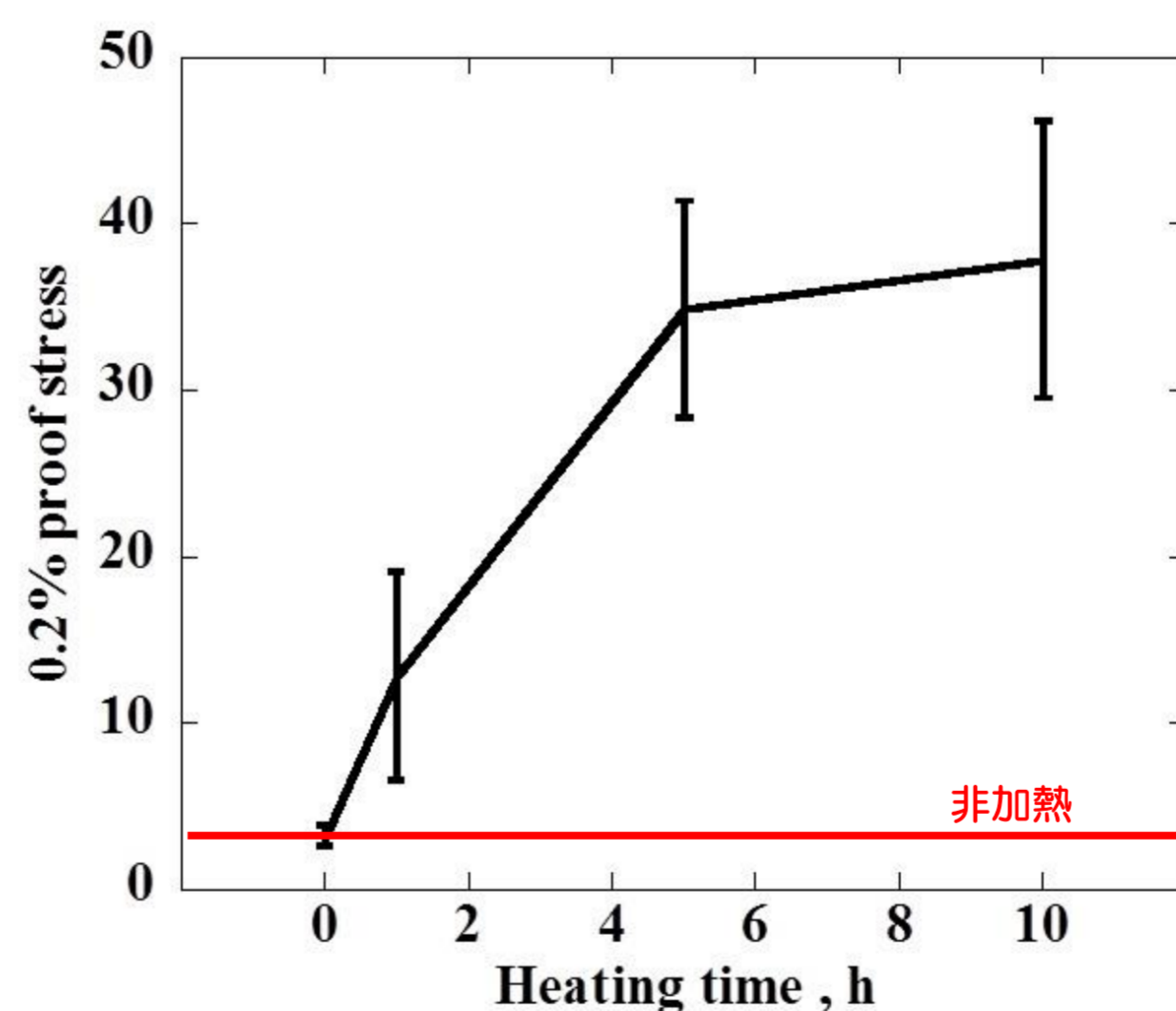


図5. 加熱時間による0.2%耐力の変化

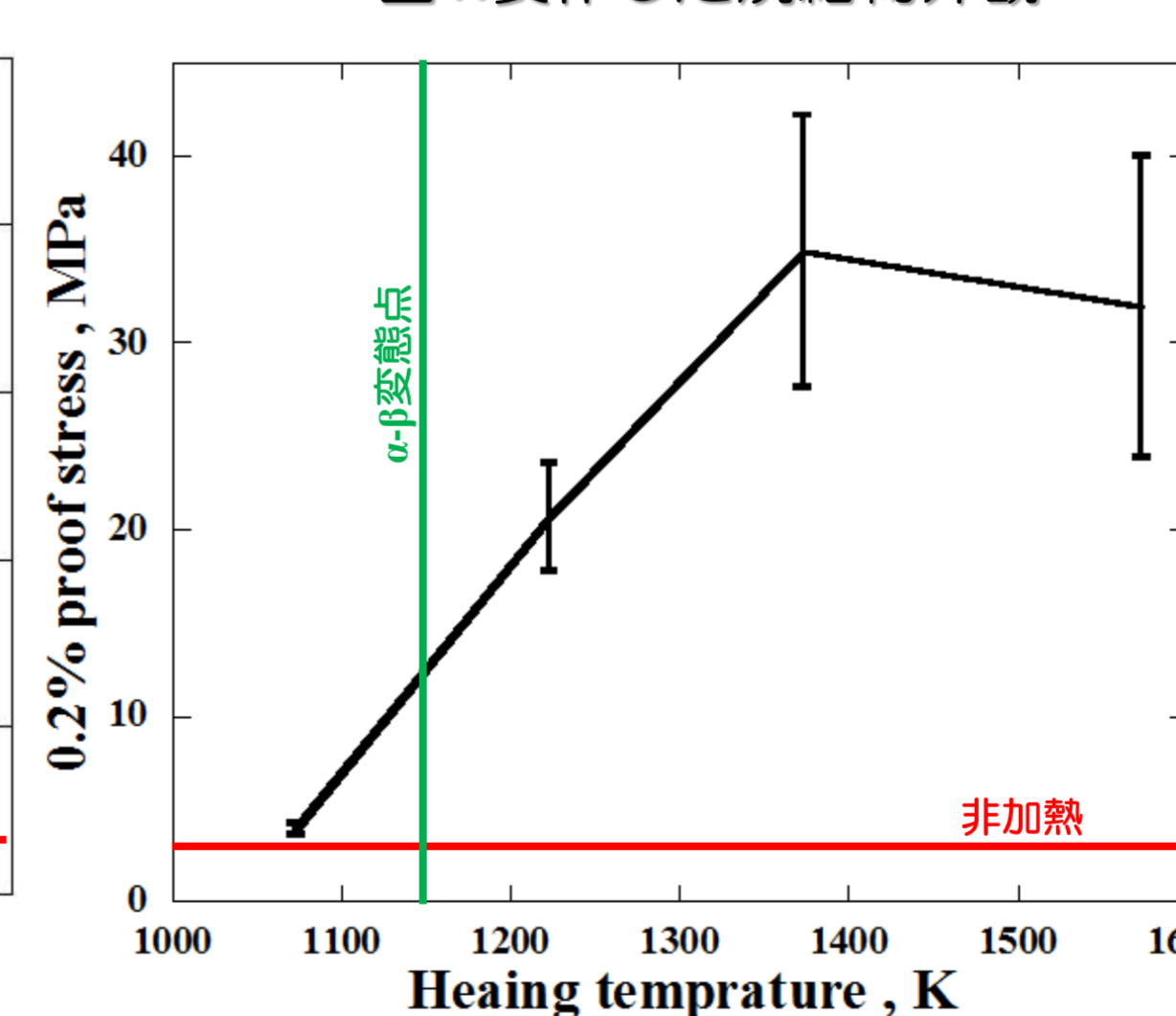


図6. 加熱温度による0.2%耐力の変化

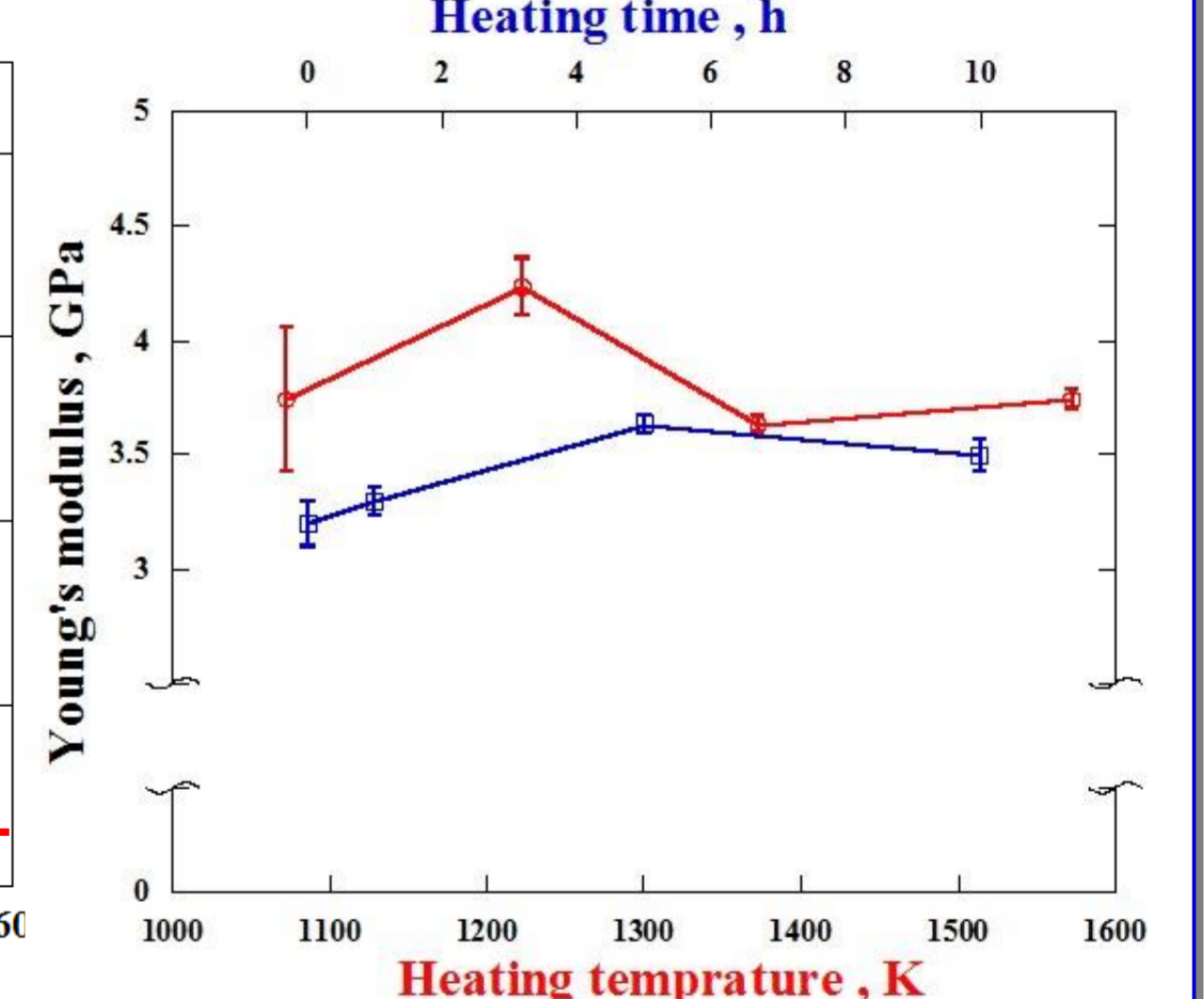


図7. 真空加熱によるヤング率の変化

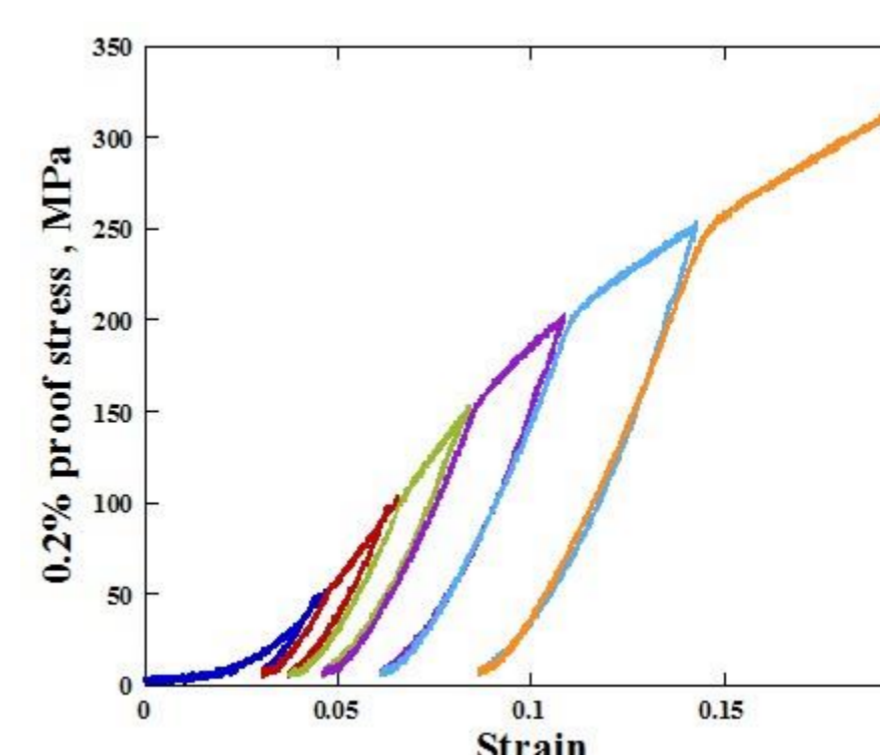


図8. 実際の応力ひずみ線図

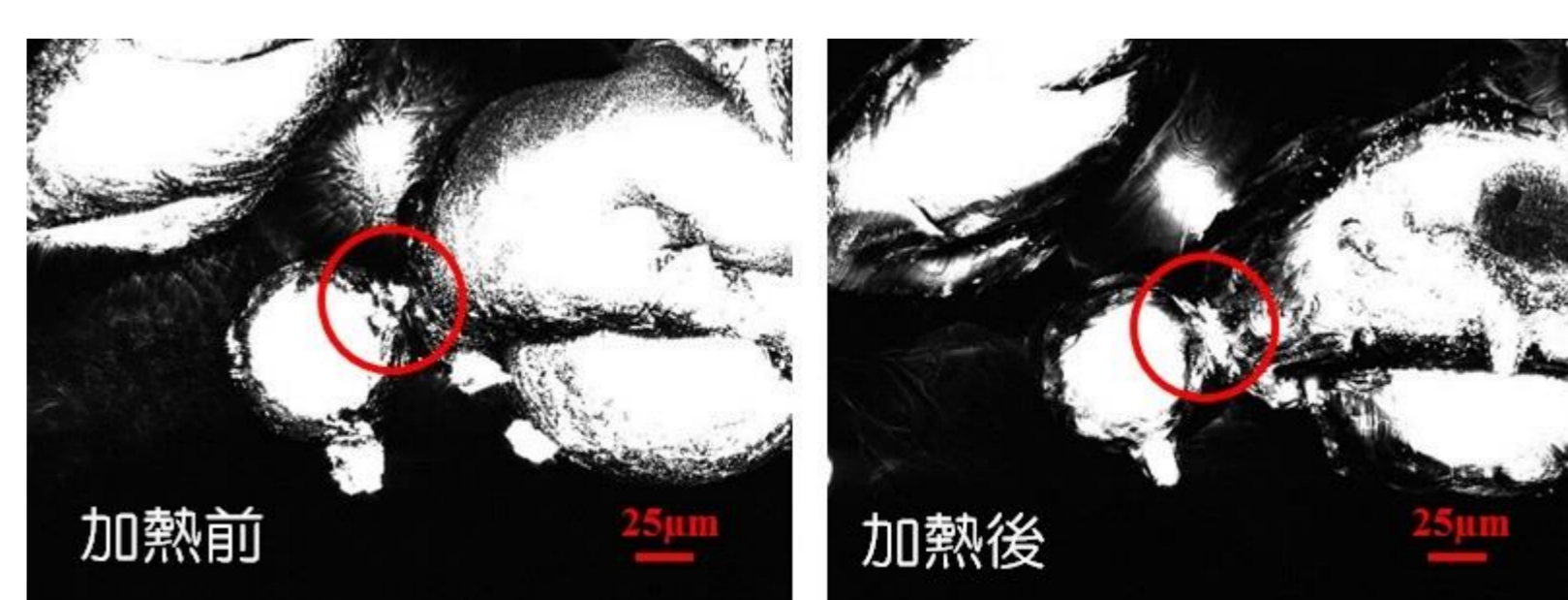


図9. 加熱前後の粉末の結合部外観

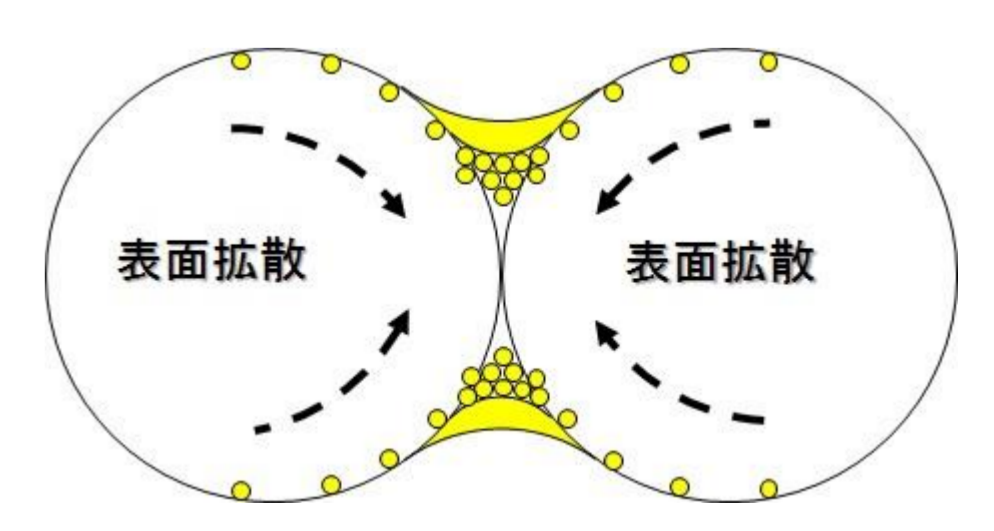


図10. 結合部の強化機構概略図

4. 結言

- レーザ焼結により製作した焼結物を真空加熱することで強度の向上が確認された。
- 真空加熱5hまでは強度が大幅に上昇し、5h以上では強度の上昇は限定的になることが確認された。
- α - β 変態点以上の温度で真空加熱することで強度が上昇するが、1100 $^{\circ}\text{C}$ 以上の加熱温度では強度向上の効果が飽和することが確認された。
- 真空加熱によってヤング率は変化しないことが確認された。