

| | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----|-------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | 中本 貴之 |
| 論文題目 | 金属粉末積層造形法における造形物の高性能化に関する研究 | | |
| <p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、金型や機械部品などの試作・開発や小ロット生産分野で注目されている金属粉末積層造形法(Selective Laser Sintering, 以後 SLS 法と略す)において、造形物の高性能化による SLS 法の工業的な推進を目的に、これまで利用事例が少ないプレス金型や鍛造金型のように高強度・高硬度が要求される用途への展開を目指し、鋼系材料の緻密体が得られる SLS 造形技術の開発を、また、高性能な人工骨への用途展開を目指し、チタンのポーラス体 that 得られる SLS 造形技術の開発を試みた結果をまとめたものであって、7 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、本研究の背景、金属粉末積層造形法の特徴、現状の研究動向や課題などを明確にした上で、本研究の目的と方針について述べている。</p> <p>第 2 章では、鋼系粉末の SLS 造形に関する基礎的研究として、低炭素鋼(炭素量 0.14 mass%)粉末に着目し、造形物内部の空隙の形成に及ぼすレーザ照射条件の影響について論じている。レーザの出力は高く、走査速度は遅く、走査ピッチは狭く、積層厚さは薄い方が、空隙の体積割合は減少し、高密度な造形物が得られることを見出している。また、エネルギー密度の増加とともに造形物の密度は高くなり、エネルギー密度が 800 J/mm^3 程度で作製した造形物は、溶製材のように、空隙が認められない緻密体となることを明らかにしている。さらに、SLS 造形物の延性と強度の向上には、空隙の完全な除去が不可欠であることを見出している。</p> <p>第 3 章では、高強度・高硬度の造形物を得るために、さらに炭素量の多い高炭素鋼粉末の SLS 特性について論じている。炭素鋼粉末を用いた造形物の緻密化に必要なエネルギー密度は、炭素量 0.33 と 0.49 mass% では 400 J/mm^3、炭素量 0.76 と 1.04 mass% では 267 J/mm^3 と、炭素量の増加とともに減少することを明らかにしている。また、空隙が認められない緻密な SLS 造形物の降伏応力と硬さは、炭素量が一定の場合、投入されるエネルギー量がより低い造形物で、より高い値を示す傾向が認められる。従って、造形したままの状態でも高強度・高硬度な造形物を得るには、高密度な造形物を得ることができる投入エネルギー密度を極力低くすることが必要であることを見出している。</p> <p>第 4 章では、炭素鋼に比べて、耐摩耗性や耐食性などの特性の向上が期待できる合金鋼に着目し、機械部品用途を想定した低合金鋼 SCM430 粉末ならびにプレス金型用途を想定した高合金鋼 SUS420J2 粉末の SLS 特性について論じている。高合金鋼 SUS420J2 粉末の SLS 法により作製した高密度かつ高硬度なプレス金型は、溶製材の SKD11 型に比べて金型の硬さが低いため、連続絞りにおける耐久性は劣るが、低粘度スピンドル油を用いた場合、高密度 SLS 型表面の微細孔による潤滑性の向上により、</p> | | | |

両者の成形荷重はほぼ同等あるいは高密度 SLS 型のほうがやや低くなり、SLS 法により作製したプレス金型でも、工業的にほぼ同様に利用できる可能性を提示している。

第 5 章では、鋼の SLS 造形物に対して、耐摩耗性を向上させるために工業的に広く利用されている表面硬化処理(ガス軟窒化処理およびプラズマ窒化処理)の適用を試みた結果について論じている。窒化処理した試験片表層に Fe_4N と $\text{Fe}_{2.3}\text{N}$ 相で構成される化合物層が観察され、表面部の硬さは未処理の試験片の硬さに比べて 2 倍程度の高い値を示し、摩擦・摩耗試験の結果より SLS 造形物の耐摩耗性が著しく改善できることを実証している。

第 6 章では、チタン粉末の SLS 特性について論じている。SLS のポーラス構造として、レーザ照射条件により、空隙が閉じた穴を有する構造体と貫通孔を有する構造体の 2 種類を創製できることを見出している。特に貫通孔を有する造形物の場合、気孔と平行方向の応力負荷では気孔周辺に応力集中が生じにくいため、ヤング率と降伏応力は造形物の密度の減少とともに緩やかに減少することを示し、人間の皮質骨と比べて、高強度かつ同等のヤング率を有する構造体を作製できている。さらに、造形雰囲気(アルゴン)中に空気を導入して造形することで、チタンの固溶強化により、ヤング率をほとんど変えずに SLS 造形物の強度を改善できることを明らかにしている。

第 7 章は総括であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、金型や機械部品などの試作・開発や小ロット生産分野で注目されている金属粉末積層造形法(SLS法)において、造形物の高性能化によるSLS法の工業的な推進を目的に、これまで利用事例が少ないプレス金型や鍛造金型のように高強度・高硬度が要求される用途への展開を目指し、鋼系材料の緻密体が得られるSLS造形技術の開発を、また、高性能な人工骨への用途展開を目指し、チタンのポーラス体 that 得られるSLS造形技術の開発を試みた結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 炭素鋼粉末のSLS法において、造形物の密度はレーザーのエネルギー密度の増加とともに高くなり、溶製材のように空隙が認められない緻密な造形物が得られるエネルギー密度にしきい値が存在すること、またその値は炭素鋼粉末に含まれる炭素量の増加とともに減少することを明らかにした。さらに、造形したままの状態を高強度・高硬度な造形物を得るには、高密度な造形物を得ることができる投入エネルギー密度を極力低くすることが必要であることを見出した。

2. 高合金鋼粉末のSLS法により作製した高密度かつ高硬度なプレス金型は、溶製材のSKD11型に比べて金型の硬さが低いため、連続絞りにおける耐久性は劣るが、低粘度スピンドル油を用いた場合、高密度SLS型表面の微細孔による潤滑性の向上により、両者の成形荷重はほぼ同等あるいは高密度SLS型の方がやや低くなり、SLS法により作製したプレス金型でも、工業的にほぼ同様に利用できる可能性を提示した。

3. 鋼のSLS造形物に対して、耐摩耗性を向上させるために工業的に広く利用されている表面硬化処理(ガス軟窒化処理およびプラズマ窒化処理)の適用を試みた結果、窒化処理した試験片表層に化合物層が観察され、表面部の硬さは未処理の試験片の硬さに比べてかなり高い値を示し、SLS造形物の耐摩耗性が著しく改善できることを実証した。

4. チタン粉末のSLS法において、SLSのポーラス構造として、レーザー照射条件により、空隙が閉じた穴を有する構造体と貫通孔を有する構造体の2種類を創製できることを見出した。特に貫通孔を有する造形物の場合、気孔と平行方向の応力負荷では気孔周辺に応力集中が生じにくいため、ヤング率と降伏応力は造形物の密度の減少とともに緩やかに減少することを示し、人間の皮質骨と比べて、高強度かつ同等のヤング率を有する構造体を作製できた。さらに、造形雰囲気(アルゴン)中に空気を導入して造形することで、チタンの固溶強化により、ヤング率をほとんど変えずにSLS造形物の強度を改善できることを明らかにした。

以上のように、本論文はSLS造形物の高性能化を達成することで、SLS法の工業的な利用の可能性を示しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年8月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。