

令和元年6月18日現在

機関番号：84431

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06808

研究課題名(和文) レーザー金属積層造形における微小欠陥の定量評価に基づく疲労設計指針の構築

研究課題名(英文) Construction of fatigue design policy based on quantitative analysis of small defects for selective laser melting

研究代表者

平田 智丈 (HIRATA, Tomotake)

地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・主任研究員

研究者番号：20359433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、金属粉末のレーザー積層造形に注目して、熱間等方加圧(HIP)処理の採用と空隙率が異なる造形体の比較評価により、疲労特性に及ぼす内部の微小空隙の影響を調査した。HIP処理の適用においては、内部の空隙を押し潰す効果は確認できたが、ミクロ組織が大きく変化し、強度が著しく低下したため、疲労特性の評価には至らなかった。しかしながら、造形体の伸びに及ぼすHIP処理の効果において、興味深い知見を得ることができた。一方、空隙率が異なる造形体の評価においては、空隙率や空隙分布と疲労限との関係を明確にし、疲労強度に及ぼす空隙の影響を定量的に整理後、それらの結果を積層造形における疲労設計に反映させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属の積層造形は、革新的かつ創造的なものづくりには欠かせない技術となりつつあるが、技術的に不可避な内部の微小空隙を起因とした金属疲労が重要課題であり、実用化促進の弊害となっている。造形体の疲労特性に関する本研究成果によって、HIPの必要性などの議論も踏まえたレーザー金属積層造形における新しい疲労設計指針の構築を支援できる。その結果、積層造形技術において不可欠な安全かつ安心を担保できる環境づくりに大きく寄与できる。また、対象を造形体に限らず、金属疲労という普遍的な課題の中で、本研究成果やそれらを得るに至った解析手法等は、疲労特性に及ぼす内部欠陥の影響に関する議論の場で、学術的に大きく貢献できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated the influence of small internal pores on fatigue properties of selective laser melted material made of metal powder using hot isostatic pressing (HIP), and made a comparative evaluation of different materials with various porosities. Although internal pores were not observed in cases where HIP was used, the microstructure changed drastically with a significant decrease in the tensile strength of the material. Therefore, the fatigue properties could not be evaluated in such cases. Nevertheless, interesting results were obtained for the effects of HIP on the ductility of the materials. In contrast, for materials with various porosities, the relationship between the porosity, distribution of internal pores, and fatigue limit were clarified, and the influence of the internal pores on fatigue strength was evaluated quantitatively. These results were reflected to the fatigue design successfully.

研究分野：材料工学

キーワード：積層造形 金属疲労 微小欠陥 空隙 熱間等方加圧(HIP) アルミニウム合金

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

3D プリンターという名称で広く知られる三次元金属積層造形技術は、機械加工、鋳物、および粉末冶金などと比べて形状自由度が非常に高く、革新的な製品開発のツールとして期待されている。積層造形の工法には様々あるが、金属を対象とした工法としては粉末床溶融結合法 (Powder Bed Fusion) が主流である。これは金属粉末を平面に敷き詰め、レーザー等を照射して部分的に溶かして固めるといった工程を繰り返し、三次元形状に造形するという工法である。この工法においては、粉末同士の隙間部や不完全溶融部では空隙を生じることがある。以前と比較すると、粉末作製やレーザー照射の技術が向上し、粗大な空隙の発生は抑制されつつあるが、材料によっては現在でも数十マイクロオーダーの空隙は不可避の状況にある。

内在する空隙は、造形体の機械的性質に悪影響を及ぼすことが懸念される。特に、金属疲労は内部の微小欠陥の影響を受けやすい破壊現象で、造形体においては耐疲労を向上させることが実用化促進の重要課題である。このような背景から、積層造形の分野では疲労特性に関する研究が注目されているが、空隙の大きさや数量等が疲労特性に及ぼす影響を定量的に解析した報告は皆無である。したがって、『金属疲労』という普遍的な課題に対し、空隙の影響を定量的に解析して疲労設計に反映させ、積層造形技術において不可欠な安全かつ安心を担保できる環境づくりを推し進めることが、積層造形の利用促進には必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、金属粉末のレーザーによる三次元積層造形に注目し、造形体の静的強度と疲労強度との関係を調査し、内部の空隙が造形体の疲労特性に及ぼす影響を定量的に評価する。その結果、得られた成果をフィードバックし、積層造形における疲労設計指針を構築後、積層造形を利用した創造的なものづくりを活性化させ、安心・安全かつ豊かな社会の構築を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、積層造形用金属粉末として、アルミニウム合金 (Al-10mass%Si-0.4mass%Mg) を選択する。アルミニウムは軽量で熱伝導性に優れることから、軽量化部材や熱交換部品への展開が期待される。さらに、本研究での欠陥解析手法の一つに、X線CT装置を利用することを計画しているため、低密度なアルミニウムは最適である。この粉末を用いて、直径7mm、高さ55mmの円柱状造形体 (造形方向は長手方向) を作製し、そこから各種試験片に加工し、引張特性や疲労特性等の機械的性質を調査した。

疲労特性に及ぼす内部の空隙の影響を定量的に評価するためには、内部に空隙のない造形体の特性との比較評価が理想であるが、アルミニウム合金では、そのような造形体の作製は技術的に困難である。したがって本研究では、以下の二つの手法の採用により、その評価の実現を目指す。

(1) 造形後処理により、内部の空隙の除去を試みる。具体的には、熱間等方加圧 (HIP) 処理の採用により、内部に空隙のない造形体を作製し、それらの疲労特性を評価する。HIPは、粉末冶金材や鋳造材においては工業的に利用されるケースが多いが、積層造形の分野においても安全性を考慮し、適用を検討するケースが多い。しかしながら、アルミニウム合金の造形体においては、HIP処理に関する報告例がないため、疲労特性に及ぼす空隙の影響の評価に加え、HIP処理の効果についても併せて調査する。

(2) 空隙量の異なる造形体を複数準備し、それらの疲労特性を調査後、空隙量と疲労特性との相関性の評価を試みる。レーザーの照射条件を変え、複数種類の造形体を作製後、空隙量と疲労限との関係を求め、それらの近似式から空隙の影響を定量的に評価する。空隙量は造形体の相対密度と相関性があり、相対密度はレーザー照射時のエネルギー密度と相関性があることが知られている¹⁾。そこで、最も緻密な造形体が得られる条件を基準として、より低いエネルギー密度となる照射条件をいくつか選択後、それらの条件にて造形体を作製する。また、各造形体においては、X線CT装置により内部の空隙の分布状態を定量的に解析し、さらにはフラクトグラフィを活用し、疲労強度に影響した空隙の形態を確認後、それらの結果と疲労特性との相関性を調査する。

以上の手法により、内部の空隙の影響を定量的に評価し、レーザー金属積層造形における疲労設計指針を構築する。

4. 研究成果

4.1. HIP処理を利用した空隙の影響調査

疲労強度に及ぼす内部の空隙の影響を調査するために、造形体にHIP処理を施し、それらの疲労特性の評価を試みた。また、アルミニウム合金の造形体におけるHIP処理の効果も確認するため、空隙率の異なる4種類の造形体 (相対密度はサンプルA; 99.96%、サンプルB; 99.85%、サンプルC; 98.68%、サンプルD; 97.99%で、A、B、C、Dの順で、レーザーのエネルギー密度がより低い条件となる) を準備し、それらに対し、HIP処理後、特性を比較評価した。

4.1.1. 内部の空隙状態

図1に、HIP処理前の造形体の長手方向中央付近をX線CT装置にて解析した結果を示す。図中の黒色部が空隙に相当する。最も相対密度の高い、すなわち空隙量の少ないサンプルAで

は、内部に空隙が認められるものの、100 μm 以下の非常に小さな空隙しか検出されなかった。しかしながら、相対密度の低下に伴い、空隙の量や大きさが増大し、サンプル D では非常に多くの空隙が認められた。一方、HIP 処理後の結果を図 2 に示すが、本研究では HIP 時に造形体を金属箔等で封入せずに処理しているため、サンプル C や D において外部に開口した空隙（隙間）はそのまま残存していた。しかしながら、内部に関しては、いずれの造形体においても空隙は認められず、HIP 処理によって、空隙の生成に大きく影響を与えていることがわかる。

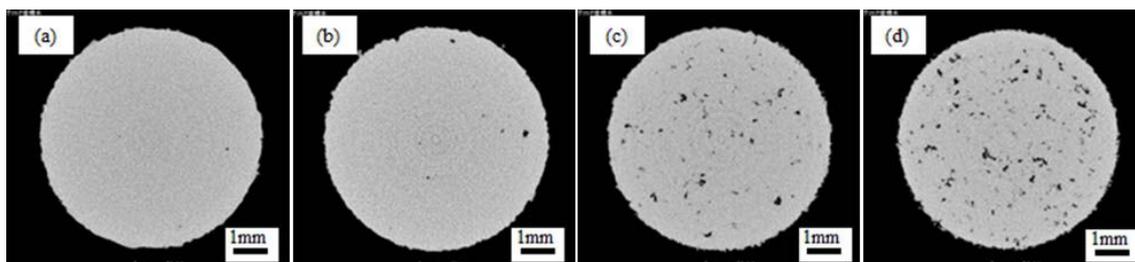


図 1 HIP 処理前の各造形体における垂直断面の X 線 CT 像：(a)サンプル A、(b)サンプル B、(c)サンプル C、(d)サンプル D

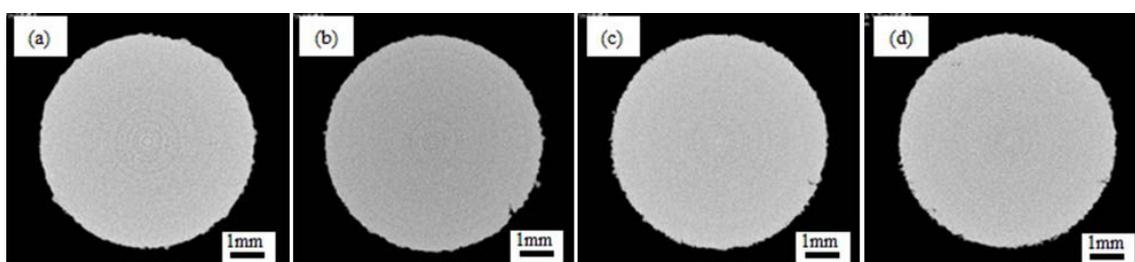


図 2 HIP 処理後の各造形体における垂直断面の X 線 CT 像：(a)サンプル A、(b)サンプル B、(c)サンプル C、(d)サンプル D

4. 1. 2. ミクロ組織

図 3 に、HIP 処理前の各造形体のミクロ組織を示す。図中の濃灰色部が初晶（Al）相で、淡灰色部が Si 系晶出相である。いずれの造形体も、非常に微細なセル状デンドライト組織を呈しているが、相対密度の低下、すなわちエネルギー密度の低下に伴い、より微細な組織が認められた。次に、図 4 に HIP 処理後の各造形体のミクロ組織を示す。相対密度の違いによる組織形態の差異は認められないが、いずれも HIP 処理前と比較すると組織が劇的に変化しており、セル状組織から粒状の Si 相に変化した。したがって、ミクロ組織変化に起因した機械的性質の変化が懸念される。

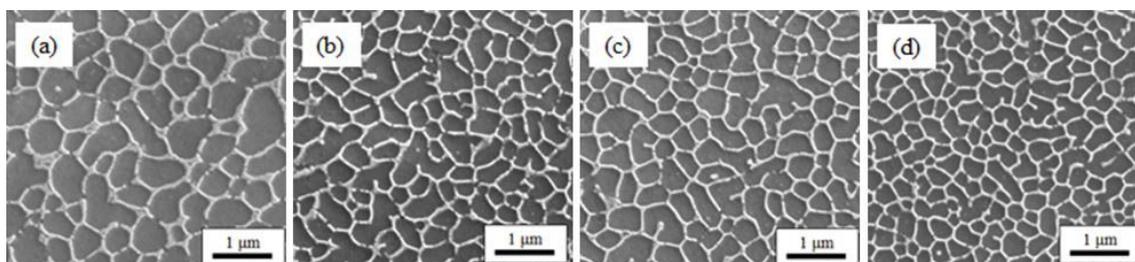


図 3 HIP 処理前の各造形体における垂直断面のミクロ組織：(a)サンプル A、(b)サンプル B、(c)サンプル C、(d)サンプル D

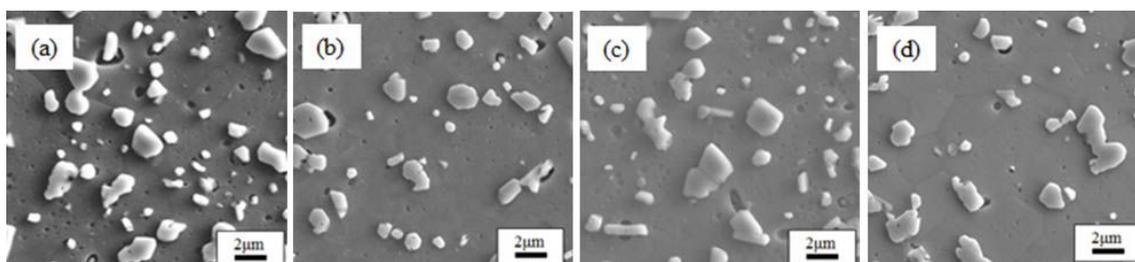


図 4 HIP 処理後の各造形体における垂直断面のミクロ組織：(a)サンプル A、(b)サンプル B、(c)サンプル C、(d)サンプル D

4.1.3. 造形体の引張特性

図5にHIP処理前の各造形体の引張特性を示す。0.2%耐力においては、相対密度の違いによる差は認められなかった。一方、引張強さにおいては、最も相対密度の高いサンプルAでは約470MPaを示し、熱処理型の2000系アルミニウム合金に匹敵する値を示した。しかしながら、造形体の相対密度の低下に伴い、引張強さは低下し、伸びに関しても同様に低下する傾向が認められた。次に、図6にHIP処理後の各造形体の引張特性を示す。HIP処理を施すと、強度に関しては相対密度の依存性が消失するが、0.2%耐力、引張強さとともに大幅な低下が認められた。これはミクロ組織の著しい変化が要因として考えられるが、一般的に疲労強度は引張強度と比例関係にあるため²⁾、HIP処理の採用では、疲労特性に及ぼす空隙の影響を調査することは難しいことがわかった。一方、伸びに関しては、HIP処理後は全ての造形体で改善が認められ、HIP処理前に最も伸びが良好であったサンプルAと比較しても、全ての造形体でその値を上回った。しかしながら、強度とは異なり相対密度への依存性が認められ、HIP処理前の相対密度が低いほど伸びが低下する傾向が確認できた。この結果は、アルミニウム合金の造形体においては、HIP処理が空隙の除去に必ずしも効果的でないことを示唆しており、すなわちX線CTによる解析では内部に空隙は認められなかったが、HIP処理ではその部分の接合は十分に進まず、未接合の部分が多かったため、このような結果に至ったことが示唆される。

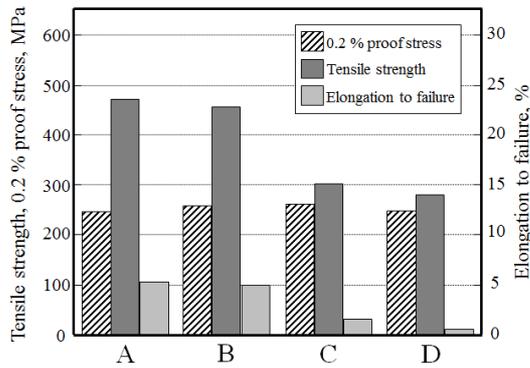


図5 HIP処理前の各造形体の引張特性

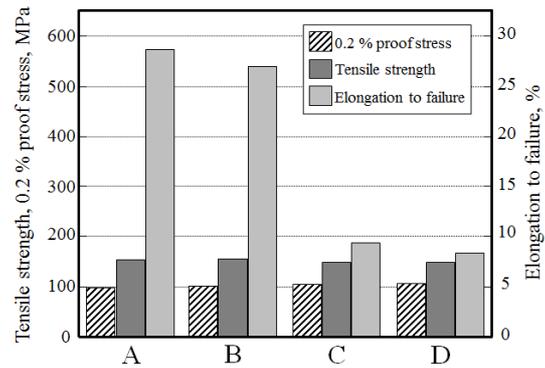


図6 HIP処理後の各造形体の引張特性

4.2. 空隙率の異なる造形体を利用した空隙の影響調査

HIP処理の適用では内部の空隙の影響を明確にすることができなかったため、次に空隙率の異なる造形体を4種類準備し、それらの疲労特性を調査後、空隙の影響の定量的な評価を試みた。なお、4種類の造形体については、4.1の節で説明したサンプルA、B、C、およびDと同じ造形体で、X線CTによる内部の調査結果は図1を、ミクロ組織は図3を、引張特性に関しては図5をそれぞれ参照していただきたい。

4.2.1. 造形体の疲労特性

図7に、各造形体の応力振幅と破断寿命との関係を表すS-N線図を示す。各造形体でのデータのばらつきに注目すると、最も相対密度の高いサンプルAでは非常にばらつきが大きい。相対密度の低下に伴い、ばらつきが軽減される傾向が認められた。また、 10^7 回の時間強度を疲労限とすると、サンプルAでは200MPaに近い値を示しているが、相対密度の低下に伴い、疲労限の低下が認められた。疲労強度に及ぼす空隙量の影響を明確にするために、相対密度と疲労限の関係をまとめた結果を図8に示す。相対密度の低い領域では疲労限の変化は小さいが、相対密度の高い領域では大幅に変化していることがわかった。特にサンプルBにおいては、サンプルAと比べると相対密度が0.1%程度しか低下していないにもかかわらず、60MPa以上も大幅に疲労限が低下しており、これらの結果は内部の空隙の影響によるものと考えられる。

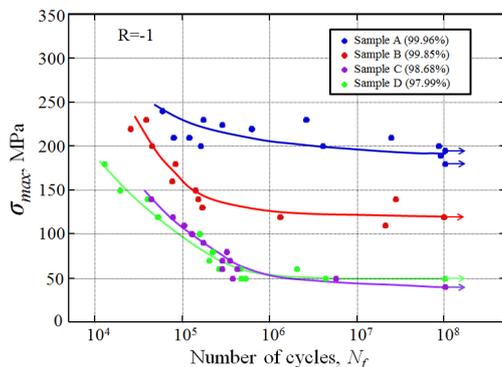


図7 各造形体のS-N線図

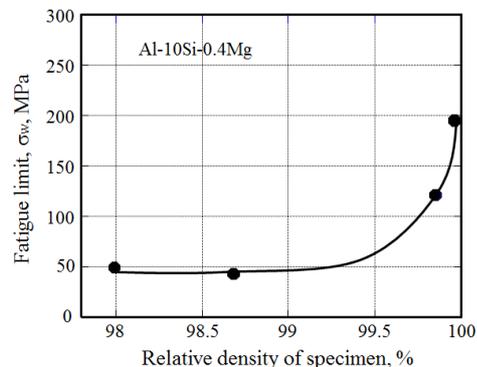


図8 造形体の相対密度と疲労限の関係

4.2.2. 疲労試験片の破断面観察

各造形体での疲労特性の違いについて、その要因を検証するために、疲労試験後の破断面を観察した。図9にサンプルAおよびDの破断面のマクロ写真およびミクロ写真を示す。ミクロ写真に関しては、マクロ写真の破断面上に認められる放射状模様から推測される、き裂の起点付近の拡大写真である。いずれの造形体においても、起点は内部の空隙であることが確認されたが、起点となった空隙の形態に関しては特徴が異なり、相対密度の高いサンプルAにおいては起点が一箇所であるのに対し、相対密度の低いサンプルDにおいては起点が複数あることが認められた。また、サンプルBやCも観察したところ、サンプルBはAの特徴に、また、サンプルCはDの特徴に近かった。これらの特徴の違いは、S-N線図の結果と良い一致を示した。すなわち、同じ種類(サンプル種)の造形体であっても、空隙の位置は試験片によって異なることが予想されるため、内部の空隙が少ない造形体は特性のばらつきが大きく、逆に空隙が多い造形体はばらつきが小さくなったと考えられる。

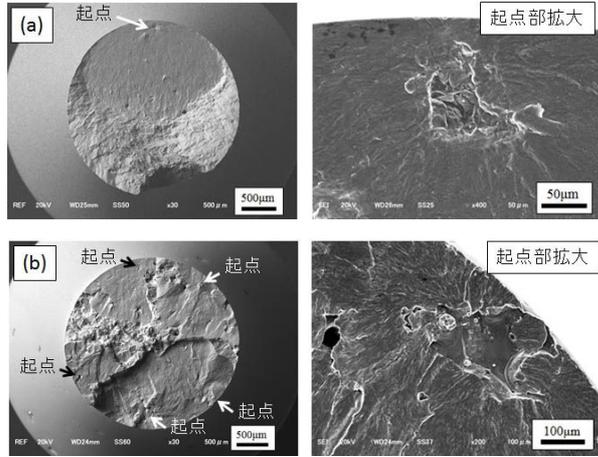


図9 疲労試験後の破断面写真：(a)サンプルA、(b)サンプルD、左；マクロ写真、右；ミクロ写真

4.2.3. 空隙の影響の定量化

疲労強度に及ぼす内部の空隙の影響を定量的に評価するために、X線CTによる解析結果をもとに、各造形体の空隙の分布状態を定量的に評価した。図10に、各造形体での空隙のサイズ分布の結果を示す。サンプルAでは空隙数が最も少なく、大きさも100 μm以下のものばかりであるが、相対密度の低下に伴い、空隙の数は増加し、かつより広範囲に分布した。また、サンプルCやDにおいては、1mmに近い大きさの空隙も認められた。次に、各造形体における空隙数および平均直径について、相対密度との関係で整理した結果を図11に示す。空隙の数および平均直径ともに、相対密度の増加に伴い減少しており(図中では逆数で整理しているため、縦軸の値が増加するほど空隙の数および平均直径が減少することを意味する)、図8で示した相対密度と疲労限の関係に近い傾向が認められた。すなわち、造形体の疲労特性は空隙数だけでなく大きさも強く影響していることが示唆され、破断面の観察結果とも良い一致を示した。

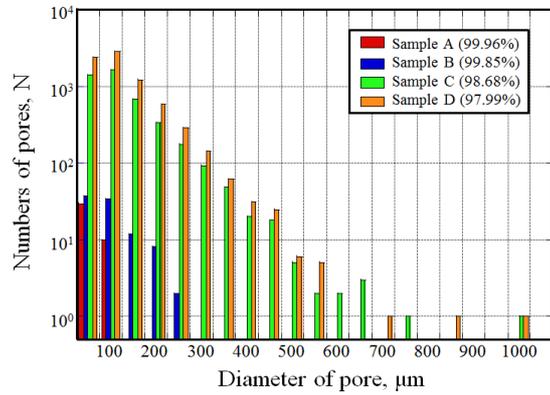


図10 各造形体内の空隙のサイズ分布

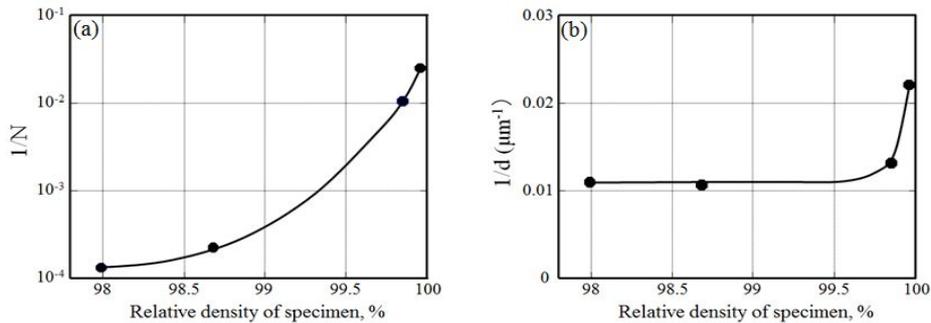


図11 造形体の相対密度と(a)空隙数の逆数、(b)平均直径(球相当)の逆数との関係

4.3. まとめ

本研究では造形体の疲労特性に及ぼす内部の空隙の影響を定量的に評価し、その影響を明確にできた。造形体の疲労強度には微小空隙が大きく影響し、それにより著しく疲労限が低下することがわかった。しかしながら、一般的に、疲労限は引張強度の半分程度の応力である²⁾ことを考慮すれば、既存の造形技術を応用すれば、十分実用に耐え得る造形体が作製できる状況にあると考えられる。この結果を造形体の疲労設計に反映することにより、積層造形技術がより普及し発展すること期待する。

<引用文献>

木村貴広、中本貴之、粉体および粉末冶金、61、2014、531-537
たとえば、藤木榮、金属材料の組織変化と疲労強度の見方、日刊工業新聞社、2004

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

平田智丈、木村貴広、中本貴之、レーザ積層造形により作製した Al-10%Si-0.4%Mg 合金における熱間等方加圧処理の影響、粉体および粉末冶金、査読有り、66、2019、29-36

D.O.I : <https://doi.org/10.2497/jjspm.66.29>

T. Hirata, T. Kimura, T. Nakamoto, Changes in microstructures and mechanical properties of selective laser melted Al-10%Si-0.4%Mg alloy after hot isostatic pressing, Trans. P.M.A.I. 査読有り、in press

平田智丈、破断面解析を活用したレーザー積層造形技術の高度化、大阪技術研テクノレポート、査読無し、平成30年度、2018、15

〔学会発表〕(計7件)

T. Hirata, T. Kimura, T. Nakamoto, Changes in microstructures and mechanical properties of selective laser melted Al-10%Si-0.4%Mg alloy after hot isostatic pressing, 5th International Conference on Powder Metallurgy in Asia(APMA2019)、2019

平田智丈、木村貴広、中本貴之、レーザ積層造形法により作製した空隙率の異なる Al-10%Si-0.4%Mg合金の疲労特性評価、軽金属学会、2019

平田智丈、木村貴広、根津将之、中本貴之、熱間等方加圧処理を施した Al-10%Si-0.4%Mg レーザ積層造形体のミクロ組織と機械的性質、粉体粉末冶金協会、2018

平田智丈、木村貴広、中本貴之、空隙率の異なる Al-10%Si-0.4%Mg レーザ積層造形体における熱間等方加圧処理の効果、粉体粉末冶金協会、2018

平田智丈、木村貴広、中本貴之、フラクトグラフィを活用した金属積層造形技術の高度化、OROST技術シーズ・成果発表会、2018

平田智丈、木村貴広、田中努、中本貴之、レーザ積層造形法により作製した Al-10%Si-0.4%Mg 合金の疲労挙動に影響を及ぼす諸因子の検討、日本塑性加工学会、2017

平田智丈、木村貴広、中本貴之、レーザ積層造形法により作製した Al-10%Si-0.4%Mg 合金の疲労特性に及ぼす内部欠陥の影響、軽金属学会、2016

〔図書〕0件

〔産業財産権〕

出願状況 0件

取得状況 0件

〔その他〕

ホームページ等なし

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：中本 貴之

ローマ字氏名：NAKAMOTO, Takayuki

所属研究機関名：(地独)大阪産業技術研究所

部局名：加工成形研究部

職名：主任研究員(現室長)

研究者番号(8桁)：40393300

研究分担者氏名：木村 貴広

ローマ字氏名：KIMURA, Takahiro

所属研究機関名：(地独)大阪産業技術研究所

部局名：加工成形研究部

職名：主任研究員

研究者番号(8桁)：50712907

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。