

技術資料

Technical Data

大型品の3D造形を可能とするプラスチック金型用 ステンレス系粉末の開発

頼近瑛斗*, 富山耕介*, 熊谷祥希*

Development of Stainless Steel Powder for Plastic Molds that Enables 3D Printing of Large Products

Akito YORICHIKA, Kosuke TOMIYAMA and Yoshiki KUMAGAI

Synopsis

Laser beam powder bed fusion (PBF-LB) is an interesting and attractive technology used for many applications in various industries such as mold-making, medicine and aerospace. However, defects such as part distortion and delamination resulted from process-induced residual stresses are limiting a wider uptake of PBF-LB.

In order to solve this problem, we developed LTXTM420, which eliminates tensile residual stress by martensitic transformation expansion. LTXTM420 has reduced thermal distortion while the mechanical and thermal properties are equivalent to SUS420J2 tool steel.

1. 緒言

金属積層造形（Additive Manufacturing, 以下、AMという）は、特に航空宇宙分野やエネルギー・産業機器分野、自動車分野などのさまざまな分野において実用化が進んでおり、また造形装置の性能向上や造形技術の発達により造形可能な材料が増えている¹⁾。金型においてもAMの適用が可能であると考えられており、日本国内のみならず、世界でAM技術を用いた金型の試作や量産が実施されている。

金属AMは材料の形態や供給方法、熱源などによって複数の手法に分類される。現在最も広く普及している方式はレーザービームを用いる金属粉末床溶融結合法（Powder Bed Fusion-Laser Beam, 以下、PBF-LBという）である。PBF-LBの模式図をFig. 1に示す。本方式は金

属粉末を厚さ数十 μm に敷き詰めて粉末床とした後、微細レーザーを熱源として粉末床を選択的に溶融凝固させるプロセスであり、このプロセスを繰り返すことで、形状自由度が高く複雑形状の作製が可能といった特徴がある²⁾。

PBF-LBを金型製作に適用した場合の従来法と比較してのメリットとして、分割で製作していた金型部品を金属AMでは一体型として製作できるため、短納期で金型製作が可能であることが挙げられる²⁾。また、切削加工や放電加工などでは製作できない複雑な形状の冷却水用配管の配置が可能となるため、金型の温度調節が容易となり、製品成形時のサイクルタイムが低減可能であること、成形品の品質が向上できること、および金型寿命が向上可能であることが報告されている³⁾。

ここで、従来ダイカスト金型で使用されているJIS SKD61（以下、SKD61という）や、プラスチック射出

2023年9月25日 受付

* 大同特殊鋼株式会社技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

成形金型で使用されている SUS420J2 系鋼種を、PBF-LB での金型製作に適用する場合、造形時に硬化し、低靱性であるため割れやすいという課題がある。そのため現在は造形時に軟らかく、靱性が高く割れにくいマルエージング鋼が主に使用されている³⁾。しかし、マルエージング鋼粉末は特定化学物質である Co を含むため健康障害防止措置が必要であること、および輸出規制に該当するという課題がある。したがって、SKD61 系 / SUS420J2 系の材料で造形可能な粉末の実現が望まれている。

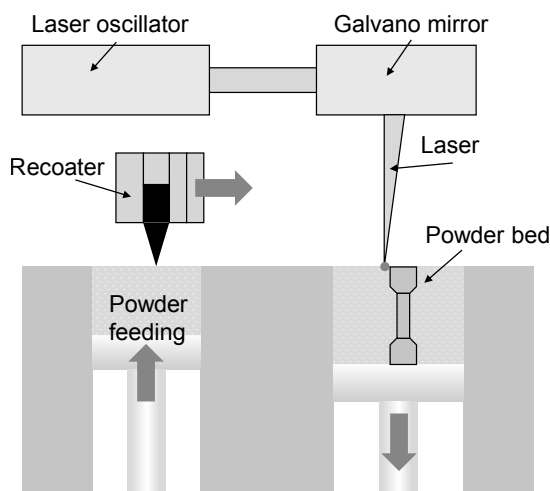


Fig. 1. Schematic diagram of PBF-LB system.

大同特殊鋼(株) (以下、当社という) では、ダイカスト金型用の粉末として SKD61 の成分を改良し、SKD61 より造形しやすく高熱伝導性である HTC™45, 40、および造形時の変形を抑制し、造形性を向上させることで大型品が造形可能である LTX™を開発し、金型部品メーカーへの展開を進めている²⁾ (「造形性に優れた」とは、造形時に割れが発生することはなく、大型品を造形できるほど良いと定義する)。また、プラスチック金型用の粉末においても、造形性に優れた SUS420J2 系粉末の開発が求められている。そこで、SUS420J2 系の鋼材と同等の機械特性・物理特性を有しつつ、造形性に優れ、大型品の造形が可能である LTX™420 を開発した。LTX™420 の位置付けを Fig. 2 に示す。LTX™420 は造形後の熱処理により SUS420J2 と同等の硬さが得られ、かつマルエージング鋼と同等の造形性を有する粉末である。また、LTX™420 は Co を含有していない。本報では、LTX™420 の造形変形低減のコンセプトと、基礎的な機械特性・物理特性、および造形例を紹介する。

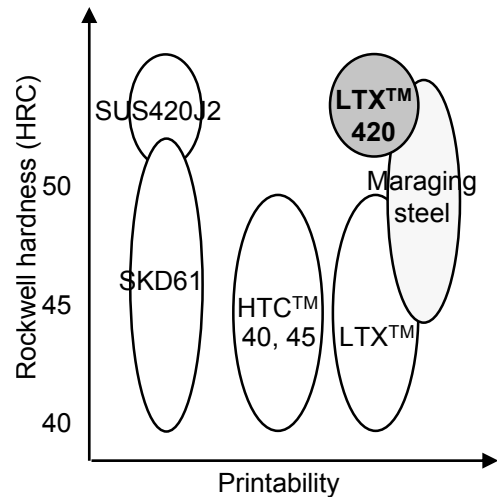


Fig. 2. Positioning diagram of metal powders for additive manufacturing.

2. LTX™420の造形変形低減のコンセプト

一般に、PBF-LB では溶融凝固に伴う熱収縮が、下層の凝固相ならびにベースプレートへの拘束によって制限されるため、造形物が下に凸の変形を示すことが報告されている⁴⁾。一方、マルエージング鋼は造形物の変形が小さく、造形物が上に凸の変形を示すことが報告されている。その理由として、マルエージング鋼は炭素含有量が低いことに加え、ダイカスト金型の造形で使用されている汎用の PBF-LB 装置の最大予熱温度である 200 °C に対し、Ms 点 (マルテンサイト変態開始温度) が 220 °C であり、造形中に未変態オーステナイトが多く存在するため、①造形中は軟らかく、熱応力を塑性変形によって緩和できること、②造形後の冷却時にマルテンサイト変態して膨張することで、熱収縮により発生する引張残留応力が緩和されること、が考えられる。これを利用し、当社で開発した LTX™は、SKD61 の Ms 点を 200 °C まで低下させることで、造形性を向上させた⁴⁾。

プラスチック金型に用いられる SUS420J2 の Ms 点は LTX™と同等の 200 °C であるが、プラスチック金型の造形では、造形と同時に切削加工を行うことが多いため、これらの装置の最大予熱温度は 120 °C であり、SUS420J2 では造形中に部分的にマルテンサイト変態することで硬化し、割れが発生してしまうリスクが高いと考える。そこで、LTX™420 では 120 °C の予熱温度で造形できるよう、Ms 点を SUS420J2 よりも低下させる成分を検討した。

3. 合金設計

Table 1 に LTX™420 と、比較鋼として SUS420J2 の成分を示す。LTX™420 は以下の思想①、②に基づいて設計した。

Table 1. Chemical composition (mass %).

Grade	C	Ni	Cr	V
LTX™420	0.27	1.5	13	0.10
SUS420J2	0.34	0.01	13	0.01

① C量を SUS420J2対比で低減させた。

SUS420J2では造形まま硬さが 55 HRCと高く、造形性が低い。前述した HTC™45, 40, および LTX™では C量を低減することで造形まま硬さを低減し、造形物の割れを抑制している⁴⁾。LTX™420にも本知見を適用した。

② Ni, V量を SUS420J2対比で増加させた。

Ms点は Finklerの式(1)⁵⁾のように、Nb, Zr, Ta, Hfを除く合金元素の添加量の増加によって低下する傾向にある。

$$Ms (\text{°C}) = 635 - 474 [C + 0.86(N - 0.15(Nb + Zr)) - 0.066(Ta + Hf)] - (17Cr + 33Mn + 21Mo + 17Ni + 39V + 11W) (\text{mass}\%) \quad (1)$$

(1)式は 8 ~ 14 mass%Cr, および 1 at% までの C, Mn, Ni, Mo, W, V を含有した鋼の連続冷却変態線図を調べる中で予測された式である。しかし、(1)式は Ni 添加時には Ms 点の実測値が計算値よりも高くなることも報告されている⁵⁾。そのため、当社で過去に検討した 13Cr 系のステンレス鋼に Ni を添加した成分での Ms 点の実測値を用いて、(1)式を補正し、使用した。

Ms 点は装置の予熱温度と同等の 120 °C まで低下させることが望ましいが、120 °C まで低下させると残留オーステナイトの存在による硬さ不足、および添加元素の影響によって熱伝導率の低下が問題となる。そのため、造形性と材料特性のバランスから、狙いの Ms 点は 170 °C とし、(1)式を補正したものを用い、基地に固溶し、耐食性の向上にも寄与すると考えられる Ni, および 500 °C での焼戻しをした際に、二次硬化により 53 HRC の硬さが得られるように V を添加した。

4. 実験方法

4. 1 造形条件

LTX™420 は Table 1 に記載の合金成分を、高周波誘導加熱大気溶解炉において溶解し、N₂ ガスアトマイズによって作製した。比較材の SUS420J2 系鋼材も同様の方

法で作製した。その後、粉末を +25/-53 μm に分級した。

実験に用いた試験片の造形は当社保有の PBF-LB 装置である、Concept Laser M2 (GE Additive 社製) を用い、Table 2 の条件で実施した。なお、本造形条件において 99.95 % 以上の造形密度が得られることを確認している。

Table 2. 3D printing conditions.

Laser power	300 W
Scanning speed	600 mm/s
Hatch width	0.13 mm
Laser spot diameter	180 μm
Layer thickness	50 μm
Preheating temperature	120 °C
Formative atmosphere	N ₂ (O ₂ <0.1 vol%)

4. 2 実験条件

Ms 点の測定にはフォーマスター試験を用いた。造形後に機械加工によって幅 15 mm, 高さ 17 mm, 長さ 150 mm の試験片を作製し、真空雰囲気にて、1250 °C で 0.5 h 加熱保持後に室温まで 100 °C /min の冷却速度で冷却し、試料寸法の変化量から Ms 点を測定した。

造形性を評価するため、下部に深さ 5 mm, 角度 90 ° の応力集中部を有する試験片を造形した。Fig. 3 に試験片形状を示す。一般に、造形高さが大きくなるほど造形物に働く残留応力は大きくなる。そこで造形高さが割れ感受性におよぼす影響を評価するため、高さ 25, 35 mm の 2 水準で造形し、応力集中部における割れ発生の有無を確認した。

焼入・焼戻し硬さ測定に用いた試験片は、LTX™420, SUS420J2 系鋼材ともに焼入れは 1030 °C で 1 h 保持後、油冷相当のガス急冷で実施した。焼戻しは各温度で 1 h 実施した。詳細は 5. 4 節で後述するが、LTX™420 は 200 °C, 500 °C の焼戻し温度で SUS420J2 系鋼材と同等である 53 HRC の硬さを示した。

引張試験、およびシャルピー衝撃試験用として、幅 15 mm, 高さ 15 mm, 長さ 100 mm のサンプルと、幅 15 mm, 高さ 15 mm, 長さ 60 mm のサンプルを造形した。造形後に焼なましとして大気炉で 700 °C × 1 h 保持後に空冷の熱処理を 2 回実施した後、焼入れとして真空炉で 1030 °C × 1 h 保持後に油冷相当のガス急冷を実施し、焼戻しは大気炉で 200 °C × 1 h 保持後、空冷の熱処理を実施し、53 ± 1 HRC に調質した。熱処理後、引張試験片は標点距離 30 mm, 平行部径 6 mm の JIS 14 A 号縮小試験片に加工し、JIS Z 2241 に準拠し、室温で試験を行った。シャルピー衝撃試験片は、幅 10 mm, 高さ 10 mm, 長さ 55 mm, 切欠き部が 2 mmU ノッチの試験

片に加工し、JIS Z 2242 に準拠し、室温で評価した。

熱伝導率測定、湿潤試験は造形物を焼なましとして大気炉で 700 °C × 1 h 保持後に空冷を 1 回した後、引張試験片と同じ焼入・焼戻しを行い、53 ± 1 HRC に調質した。熱伝導率の試験片は φ10 mm、高さ 2 mm の試験片に加工し、レーザーフラッシュ法により Ar 雰囲気中における室温 ~ 400 °C の値を測定した。湿潤試験の試験片は高さ 12 mm、幅 25 mm、長さ 40 mm の形状とし、温度 50 °C、湿度 98 % の環境下に 48 h 保持した後、外観の腐食度合いを目視にて観察した。

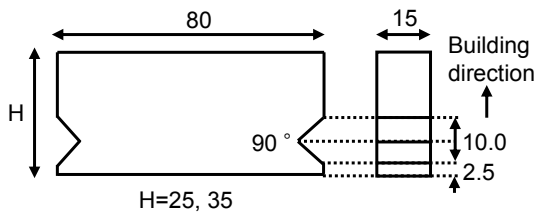


Fig. 3. Test samples for crack susceptibility test.

5. 実験結果

5. 1 フォーマスター試験 (Ms点測定)

Fig. 4 に LTXTM420 のフォーマスター試験の結果を示す。冷却過程において、オーステナイトからマルテンサイトへの相変態に伴う体積膨張が確認された。LTXTM420 の Ms 点は 173 °C であり、成分設計における狙い値とほぼ合致した。なお、LTXTM420 の M_f 点は明確には観測されなかった。

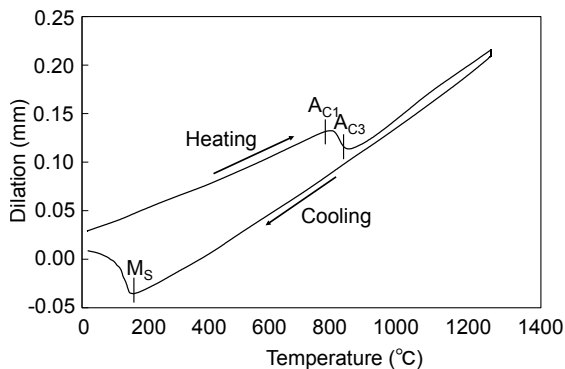


Fig. 4. Transformation behavior of LTXTM420.

5. 2 造形性

Fig. 5 に造形物の浸透探傷後の外観写真を示す。

SUS420J2 は造形高さが 25 mm の場合で小さな割れが確認された。さらに造形高さが 35 mm に増加すると割れが増大した。しかし、LTXTM420 は造形物に割れは発生しなかった。従って、LTXTM420 の造形性は SUS420J2 対比で大幅に改善しているといえる。

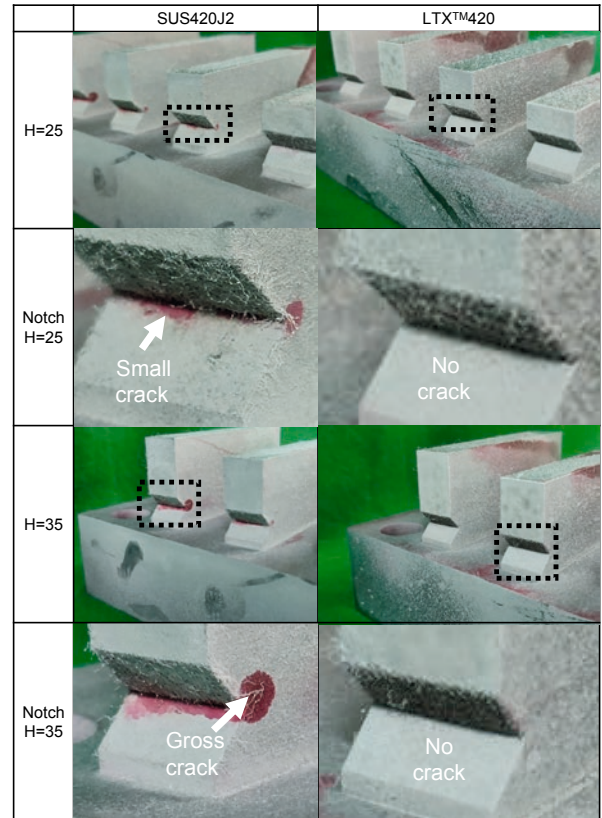


Fig. 5. Comparison of crack susceptibility between SUS420J2 and LTXTM420.

(Preheating temperature: 120 °C).

5. 3 焼戻し硬さ

Fig. 6 に LTXTM420 における焼戻し温度と硬さの関係を SUS420J2 系鋼材と比較して示す。LTXTM420 は 200 °C、500 °C の焼戻し温度で SUS420J2 系鋼材と同等である 53 HRC の硬さを示した。

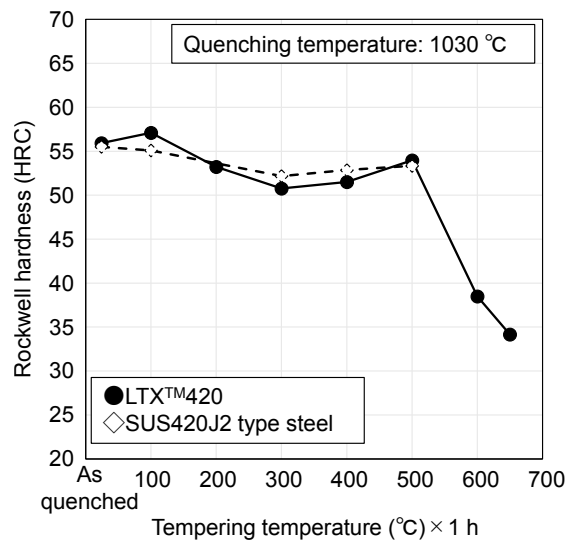


Fig. 6. Tempering hardness curve.

5. 4 機械特性

Fig. 7に53 HRCに調質したLTX™420とSUS420J2系鋼材の引張特性を示す。LTX™420の引張強さはSUS420J2系鋼材対比で同等であるが、0.2%耐力はSUS420J2系鋼材対比、低位であった。

Fig. 8に53 HRCに調質したLTX™420のSUS420J2系鋼材の衝撃値を示す。LTX™420の衝撃値は同一硬さのSUS420J2系鋼材対比で優れている。

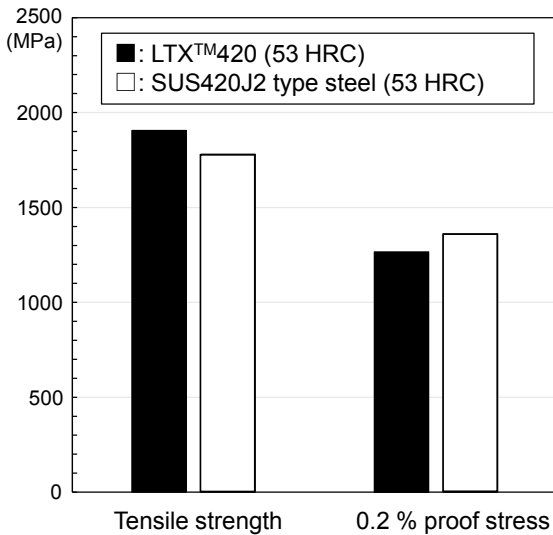


Fig. 7. Tensile strength and 0.2% proof stress.

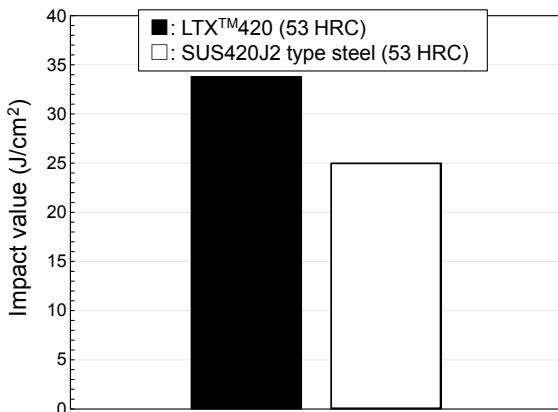


Fig. 8. Charpy impact value.

5. 5 熱伝導率

Fig. 9にLTX™420の熱伝導率をSUS420J2系鋼材と比較して示す。プラスチック金型において金型の最高温度と推測される、最高温度400℃までの温度範囲において、LTX™420の熱伝導率は、SUS420J2系鋼材といずれの温度においても同等であることが確認された。

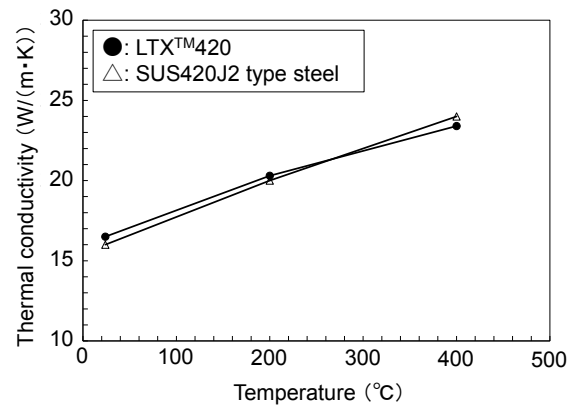


Fig. 9. Thermal conductivity.

5. 6 耐食性

Fig. 10に温度50℃、湿度90%、保持時間48hで実施した湿潤試験による耐食性評価の結果を示す。LTX™420、SUS420J2系鋼材ともに錆は認められず、本試験条件では耐食性は同等であった。

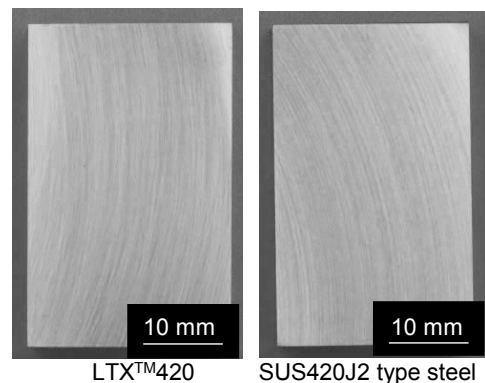


Fig. 10. Corrosion resistance.

6. 金型の製造工程および模擬型の造形例

Fig. 11にLTX™420を使用した金型の想定製造工程を示す。LTX™420は造形後の硬さが約53 HRCとなるため、切削加工が難しい。そのため、切削加工を実施する際は、造形後に焼なましを実施することが望ましい。Fig. 12にLTX™420の焼なまし特性を示す。700℃で1h保持の焼なましを2回実施することで、SUS420J2系鋼材の納入硬さと同等の、31~34 HRCに調質可能である。その後、切削加工を実施し、さらに、焼入・焼戻しによって狙い硬さに調質し、精加工を実施して使用することを想定している。またLTX™420は、高温焼戻しよりも低温焼戻しの方が機械特性に優れていることを確認

しているため、低温焼戻しを推奨する。Fig. 13に実金型を模擬した造形物の外観を示す。造形に用いたベースプレートの厚さは35 mm、造形時のベースプレート予熱温度は120℃とした。また、ベースプレートと造形部の境界にはR=3 mmの曲部を設け、応力緩和をしている。LTXTM420は曲部を設けることで、150 mm角を超える大型品が造形可能であることを確認した。

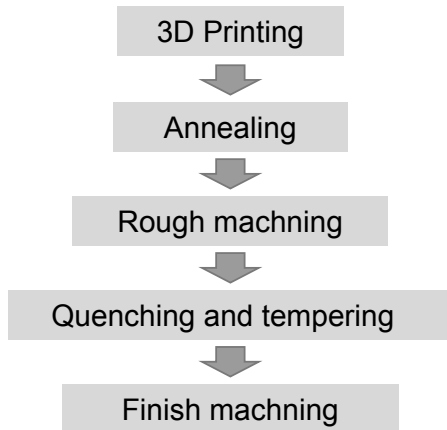


Fig. 11. Mold manufacturing process of LTXTM420.

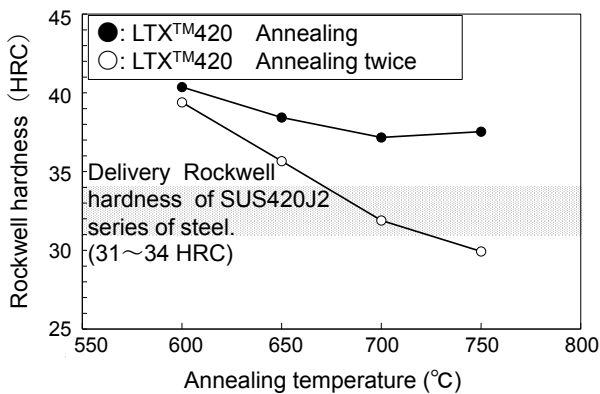


Fig. 12. Rockwell hardness of LTXTM420 after annealing.

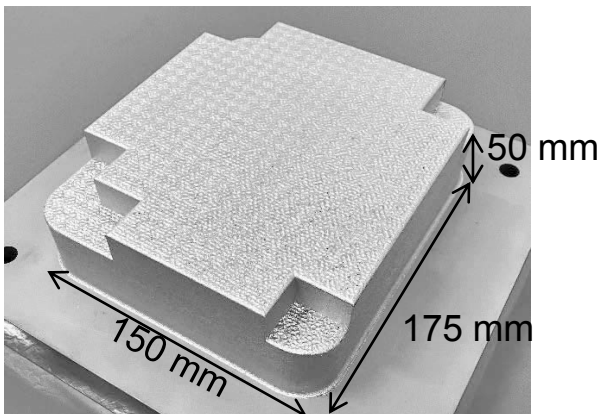


Fig. 13. Example of 3D-printed sample of LTXTM420.

7. 結 言

LTXTM420はSUS420J2対比でC量を低減し、造形時の焼入れ硬さを低減させるとともに、Ni量を増加させ、Ms点を170℃近くまで低減させたことで、プラスチック金型の造形で使用されることが多い、120℃での予熱下で大型品の造形が可能となった。LTXTM420はSUS420J2相当の機械特性・物理特性を両立しており、これまでSUS420J2では困難であった、プラスチック金型での大型品の造形において有利な粉末であると考えられる。

(文 献)

- 1) 京極秀樹：日本画像学会誌，60(2021)，333.
- 2) 阿部諭：2018年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2018)，350.
- 3) 澤崎隆：デジタルプラクティス，7(2016)，18.
- 4) 大同特殊鋼(株)：電気製鋼，92(2021)，61.
- 5) 中川英樹，宮崎亨：鉄と鋼，85(1999)，249.
- 6) 新家一郎，網岡弘至，岡崎秀二，佐野定男，宮川広康，吉田勇太，高野昌宏：スマートプロセス学会誌，10(2021)，163.
- 7) 田村今男：鉄鋼材料強度学，日刊工業新聞社，1969，39.



頼近 瑛斗



富山 耕介



熊谷 祥希