

金属粉末積層造形法を活用した 高性能部材の開発

中本貴之* 木村貴広* 四宮徳章*

1. はじめに

金属系材料を用いた付加製造 (Additive Manufacturing: AM) 技術は、金属(粉末)積層造形法とも呼ばれており、CAD モデルから複雑な金属製品を迅速に直接造形できる加工法である。金属 AM 技術の特長は、従来の金属材料の加工法として知られている機械加工・放電加工のような除去加工や、塑性加工・鋳造のような型を用いる変形加工では製造できない複雑な形状の製品を作製できることである。近年、この特長を利用した「ものづくり」が盛んに行われており、工業分野では、製品形状に応じた任意の冷却流路を金型内部に配置した射出成形金型⁽¹⁾や複雑形状を有するジェットエンジンの燃料噴射ノズルのような航空宇宙部品⁽²⁾に利用されている。また医療分野でも、本技術はテーラーメイドの各種インプラント(人工股関節, 人工骨, 歯科補綴物, 骨固定材など)を作製できる手法として注目されている⁽³⁾。

当研究所では、1999年に炭酸ガスレーザを搭載した金属 AM 装置(EOSINT-M250)を導入し、炭素鋼粉末⁽⁴⁾、合金鋼粉末⁽⁵⁾などの鋼系粉末や、チタン系粉末⁽⁶⁾を用いた造形技術の研究開発に取り組んできた。現在では、ファイバーレーザを搭載した2台の金属 AM 装置を用いて、アルミニウム系粉末⁽⁷⁾⁽⁸⁾、銅系粉末など種々の金属材料を用いた造形技術の研究開発に取り組んでいる。中でも、アルミニウムを用いた AM 技術は、その低比重・高熱伝導性を活かし、航空宇宙や自動車、機械産業分野等における軽量化部材や熱制御部品(熱交換器, ヒートシンク等)への応用が期待されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。そこで本稿では、アルミニウムを用いた AM 技術に焦点を当て、圧力部品やエンジン部品等の高い信頼性が求められる分野で利用できる JIS-AC4CH (Al-7%Si-0.3%Mg) 合金の造形技術の開発事例、および伝熱性能が高い格子構造を有するヒートシンクの開発事例について紹介する。

2. アルミニウム合金の造形技術の開発

アルミニウム合金を用いた AM 技術に関する最近の研究では、Al-10%Si-0.4%Mg (ISO-AlSi10Mg, JIS-ADC3 相当) 合金⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、Al-12%Si (ISO-AlSi12, JIS-AC3A) 合金⁽¹³⁾ などの鋳造系アルミニウム合金粉末を用いて、相対密度 99.5%以上の高密度体を得られている。これらの材料は、種々の金属 AM 装置メーカーにおいて標準のアルミニウム系材料として広く用いられている。これまでの著者らの研究⁽⁷⁾により、Al-10%Si-0.4%Mg 合金の造形物は、引張強さ 450 MPa 以上、破断伸び約10%の良好な機械的性質を示すことがわかっている。一方で、特に信頼性が要求される用途に対しては、さらに延性の優れたアルミニウム系の造形物が求められている。JIS-AC4CH (Al-7%Si-0.3%Mg) 合金は、延性と強度のバランスに優れた重力鋳造用合金として広く利用されている⁽¹⁴⁾が、これまでにその造形技術に関する報告例はほとんどない。そこで、AC4CH アルミニウム合金粉末(東洋アルミニウム製, 平均粒径 27.1 μm)を用いて、高密度体を得るためのレーザ照射条件を探索した。以下に、最適条件にて造形した高密度体の金属組織および機械的性質を評価した結果⁽¹⁵⁾について紹介する。

金属 AM 装置 (EOSINT-M280) を用いて見出した最適条件(出力250 W)にて作製した AC4CH 造形物の相対密度は 99.8%であった。図 1 に、このとき得られた造形物の断面の金属組織 (SEM 像) を示す。造形物内部の金属組織は、0.5 μm 程度のセルが積層方向すなわち熱流方向に沿って伸長したセル状デンドライトから成る。セル内は初晶 α (Al) 相、セル境界部は Si 系の晶出相である。これらはレーザ照射によって瞬時に溶解、急冷凝固したことで形成した組織であり、本プロセス特有の組織形態である。図 2 に、造形物の引張試験の結果を示す。比較として、同図中に同組成 (AC4CH 合金) の金型鋳造材 (PMC-T6) の値⁽¹⁶⁾を併せて示す。造形物の機械的性質は、積層方向に平行 (0°)、垂直 (90°) 方向とも

* 地方独立行政法人大阪産業技術研究所; 主任研究員 (〒594-1157 和泉市あゆみ野 2-7-1)
Development of High-Performance Parts Using Metal Additive Manufacturing; Takayuki Nakamoto, Takahiro Kimura, Naruaki Shinomiya (Research Division of Machining and Molding, Osaka Research Institute of Industrial Science and Technology, Izumi)
Keywords: 3D printing, additive manufacturing, selective laser melting, aluminum alloy, microstructure, mechanical property, heat treatment, lattice structure, heat exchanger, heatsink
2017年8月18日受理 [doi:10.2320/materia.56.704]

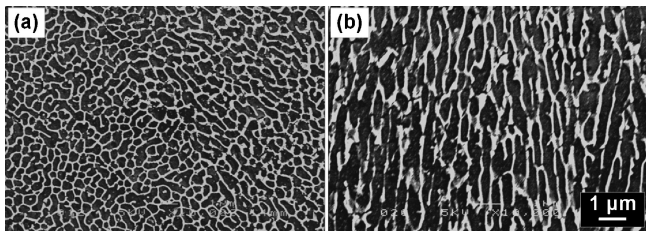


図1 最適条件にて作製した造形物の金属組織 (SEM 像) : (a) 水平断面, (b) 鉛直断面.

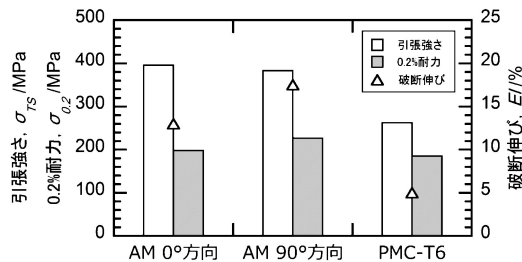


図2 最適条件にて作製した造形物の引張試験の結果.

に, 金型鋳造材と比較して引張強さ(約 400 MPa), 0.2%耐力(約 200 MPa), 破断伸び(12~17%)のいずれも大幅に高い値を示す. これは, 最適条件にて作製した造形物が相対密度はほぼ100%の高密度体であることに加え, 上述のように微細なセル状デンドライト組織を呈していることに起因すると考えられる.

次に, 熱処理(焼鈍)が造形物の組織と機械的性質に及ぼす影響について調査した. 図3に, 水平断面における熱処理後の造形物の金属組織(SEM 像)を示す. 焼鈍温度250°C以下(図3(a)~(d))では, 熱処理材は造形まま材と同様にセル状デンドライト組織を呈しているが, 焼鈍温度の上昇に伴ってセルサイズが若干粗大化している. 焼鈍温度300°C(図3(e))では, セル境界部の Si が凝集して 0.5 μm 以下の粒状析出組織に大きく変化し, 350°C(図3(f))では粒状相が 1 μm 前後まで粗大化(オストワルド成長)している. 図4に, 焼鈍温度による造形物の機械的性質の変化を示す. 焼鈍温度の上昇に伴って, 造形物の (a)引張強さおよび耐力は低下するものの, (b)伸びは大幅に向上している. このように AC4CH 造形物の焼鈍による機械的性質の変化は, 鋳造材における変化(焼鈍温度の上昇に伴って, 強度は向上し, 伸びは低下する)とは逆の傾向を示すことがわかった. 焼鈍温度250°C以下では, 温度上昇に伴うセル状デンドライト組織の粗大化により強度は低下したと考えられる. 焼鈍温度300°C以上では, セル状デンドライト組織が消失して粒状組織が形成されて, アルミニウムマトリックスが連続的に繋がったことで伸びは大幅に向上し, 強度は低下したと考えられる. 350°Cの焼鈍により引張強さ, 耐力はそれぞれ200 MPa, 125 MPa 程度まで低下するものの, 伸びは展伸材並の30%程度まで向上した.

以上のように, AC4CH アルミニウム合金を用いて最適条件にて作製した造形物は, 強度・延性のバランスに優れた機械的性質を有しており, 当研究所では高い信頼性(特に延性)が要求される部材への応用展開を現在検討している.

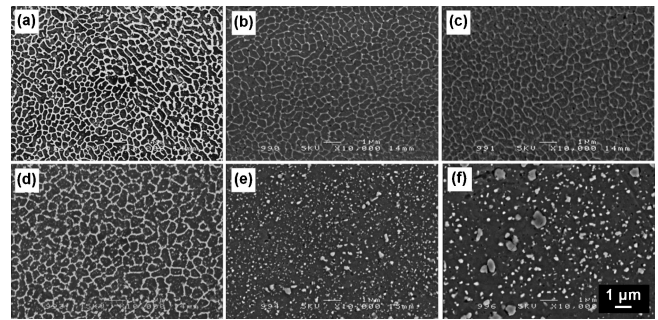


図3 水平断面における熱処理後の造形物の金属組織 (SEM 像) : (a) 造形まま, (b) 150°C, (c) 200°C, (d) 250°C, (e) 300°C, (f) 350°Cの各温度で 5 h 焼鈍.

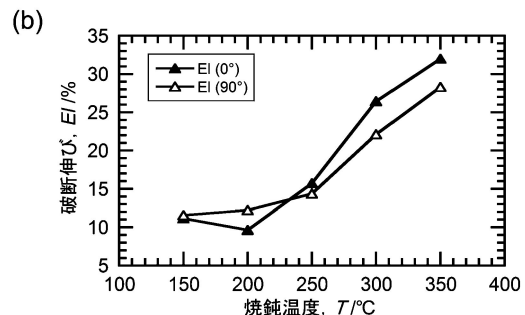
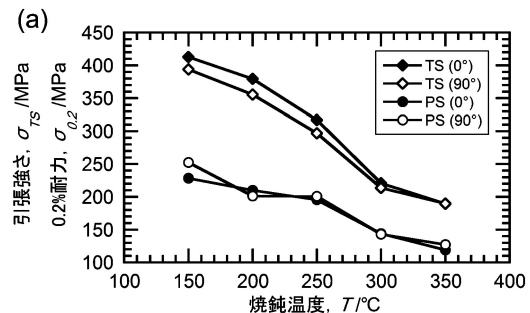


図4 焼鈍温度による造形物の機械的性質の変化 : (a) 引張強さ(TS)と0.2%耐力(PS), (b) 破断伸び(Ei).

3. 高伝熱性能を有する格子構造体の開発とヒートシンクへの応用

電気自動車, 風力発電, 家電などのインバータ技術に必要な不可欠なパワーデバイス, 発熱量が大きく, 熱設計の最適化が求められている. パワーデバイスの放熱には, ヒートシンクが一般的に用いられ, 熱源から外部の空気へ放熱されている. 近年, 発熱密度の高いパワーデバイスに対応するために, ヒートシンクの高効率化が求められており, 多孔質金属⁽¹⁷⁾や金属繊維⁽¹⁸⁾を用いたヒートシンクの研究が盛んに行われている. 多孔質金属や金属繊維は伝熱面積が大きく, 優れた熱伝達特性を示す一方で, 有効熱伝導率が低いことや流体の圧力損失が大きいことが問題である. 金属 AM は構造最適化された任意の形状を作製できるため, 圧力損失の増大を抑制しつつ伝熱性能の高いヒートシンクを作製する方法として期待できる. 本稿では, 基本的な格子構造体の伝熱性能を数値解析および実験で調べた結果⁽¹⁹⁾について紹介する.

検討した格子構造体の寸法は、全体の寸法を $W50 \times L50 \times H30$ mm とし、数値解析では対称性を考慮して $W5 \times L50 \times H30$ mm とした。図 5 に、数値解析を行った格子構造体の模式図を示す。各モデルは、伝熱面積がほぼ一定になるように梁および柱の直径を調整した。各 Cube モデルは、 x および y 方向に梁、 z 方向に柱を設けた格子構造で、(a) Cube は梁および柱の断面形状を円形(直径 2.25 mm)、(b) Cube-Td (Teardrop) は頂角 60 度の涙滴型、(c) Cube-G (Functionally gradient) は梁と柱の直径を y 方向に徐々に太くした構造、(d) Cube-C (Cone) は梁と柱の直径を z 方向に徐々に細くした構造とした。(e) Truss は z 方向の柱および x 方向の梁を千鳥配列とし、各交点を斜めの梁で繋ぐ構造とした。また、これらのモデル(「低空隙率モデル」と呼ぶ)の梁および柱の直径を全て 2 分の 1 にしたモデル「高空隙率モデル」も解析対象にした。格子構造体の材質は Al-10%Si-0.4%Mg 合金とし、その底部は 100°C 一定のもと、入口風速 $0.11 \sim 2.2$ m/s の空気 (20°C) を y 方向に流す条件で、各格子構造体の各種伝熱性能を数値解析によって求めた。

図 6 に、伝熱量と圧力損失の関係を示す。(a) 低空隙率モデルでは、圧力損失に対して、Cube-Td や Truss の伝熱量が比較的大きい。これは、Cube-Td では伝熱性能を下げることなく圧力損失を抑えられること、また、Truss では圧力損失は大きいものの、三次元的な千鳥配列特有の高い熱伝達特性を有することが理由として考えられる。一方、(b) 高空隙率モデルでは、圧力損失に対して、Cube-C の伝熱量が最も大きい。高空隙率モデルでは、梁および柱が全体的に細いため、柱の先端部にかけて表面温度は大きく低下したが、Cube-C では柱の根元の直径が大きいため、他の高空隙率モデルと比較して先端部付近の梁および柱の表面温度は高くなった。これにより、Cube-C では柱の先端部付近においても気流への伝熱量が大きくなり、ヒートシンク全体の伝熱量は他のモデルと比較して大きくなったと考えられる。また、図 6 より、Cube-G では低空隙率よりも高空隙率の場合において、圧力損失に対する伝熱量は向上することが示された。これらのことは、Cube-C や Cube-G のように梁および柱に傾斜性を付与することで、高空隙率モデルにおける伝熱性能を向上できる可能性を示唆している。

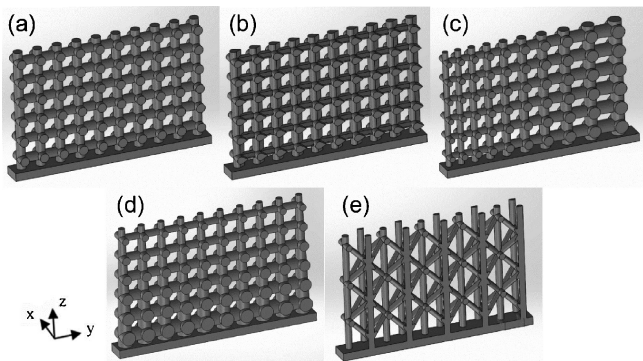


図 5 格子構造体モデル(低空隙率モデル)の模式図：(a) Cube, (b) Cube-Td (Teardrop), (c) Cube-G (Functionally gradient), (d) Cube-C (Cone), (e) Truss.

次に、(株)ダイヘンの協力のもと、上記のような伝熱性能が高い格子構造を有するヒートシンクをアーク溶接ロボットに活用した事例について紹介する。(株)ダイヘンは、ワイヤ送給と溶接電流のシンクロ制御によって幅広い電流域でスパッタの発生を大幅に抑制し、高品質溶接を実現できる、シンクロフィード溶接システム(図 7)を販売している⁽²⁰⁾。本溶接ロボット(図 7(a))では、ワイヤ送給装置(図 7(b))に搭載されるサーボモータが高速に駆動してワイヤを小刻みに正逆送させるが、その際に大量の熱が発生するため、その放熱が課題になっていた。ヒートシンクの伝熱性能が低い場合は大型のモータを取り付けて低負荷で運転する必要があるが、伝熱性能の高いヒートシンクを用いればモータの小型・軽量化が可能になり、溶接ロボットの動作領域の拡大、および動作精度の向上を図ることができる。そこで、格子構造を有するヒートシンク(図 7(c))の搭載を検討した。ヒートシンクは、Al-10%Si-0.4%Mg 合金粉末を用いて金属 AM 装置 (EOSINT-M280) により造形した。タイプ 1 は図 5(a) Cube, タイプ 2 は図 5(e) Truss に相当する格子構造を有しており、伝熱面

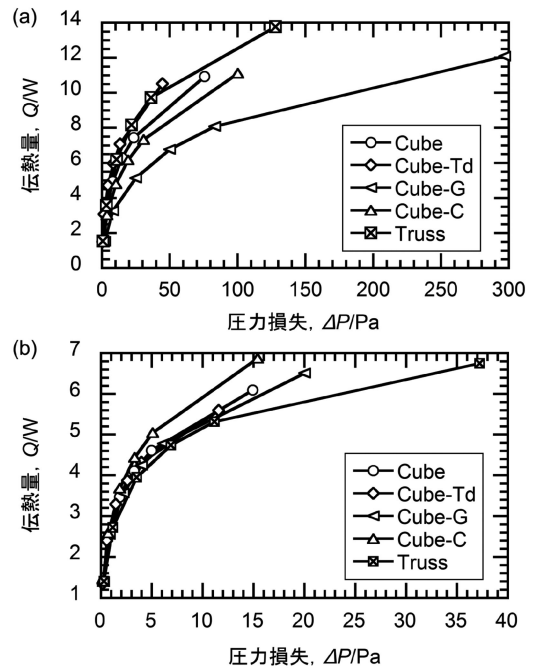


図 6 数値解析により求めた伝熱量と圧力損失の関係：(a) 低空隙率モデル, (b) 高空隙率モデル。

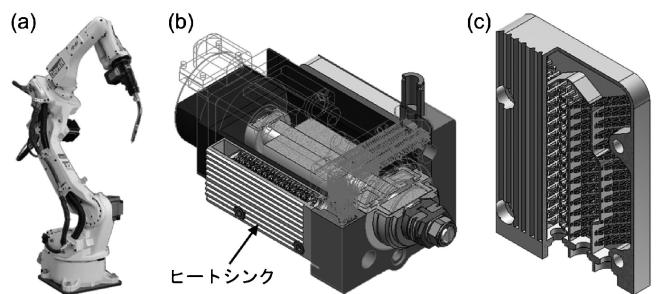


図 7 シンクロフィード溶接システム：(a) アーク溶接ロボットの外観写真, (b) ワイヤ送給装置, (c) ヒートシンクの CAD カットモデル。(株)ダイヘン提供)

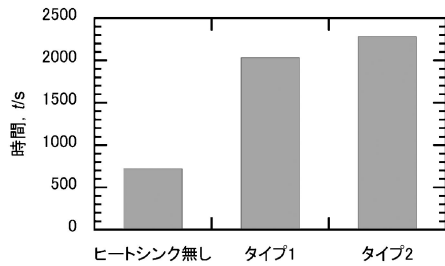


図8 モータ内部が室温から高温(90°C)に達するまでの時間.

積はほぼ同等とした. 図8に, モータ運転時の内部温度の変化から, ヒートシンクの伝熱性能を評価した結果を示す. ヒートシンク無しの場合に比べて, 金属AMで作製したヒートシンク有りの場合で, モータ内部が室温から高温(90°C)に達するまでの時間を3倍程度長くできる. これは, ㈱ダイヘンで事前に行った切削加工により作製した実験用ヒートシンクと比べても十分に長いことがわかっており, 金属AMで作製したヒートシンクは高い伝熱性能を示すと言える. また, タイプ1とタイプ2の比較では, タイプ2の方が高温に達するまでの時間をさらに12%程度長くできる.

以上のように, 格子構造体, 特にタイプ2のような Truss 構造を有するヒートシンクは高い伝熱性能を示すことを数値解析および実機測定により確認できた. 当研究所では工業用純アルミニウム⁽²¹⁾や銅合金の造形技術も確立しており, これらの熱伝導率の高い材料を用いることでヒートシンクのさらなる性能向上が期待できる.

4. お わ り に

本稿では, 当研究所におけるアルミニウムを用いた AM 技術の研究開発事例として, 材料および形状の観点から高性能部材を開発した事例を紹介した. 現状, 金属 AM 用材料のラインアップ(材料物性の選択肢)は未だ限定されており, 今後, 金属 AM 技術を高付加価値なものづくり手法の一つとして定着させていくには, 金属 AM の造形特性を考慮した金属材料とその造形技術の研究開発が益々重要になると思われる. 一方で, 金属 AM 技術を利用した製品・部材の実用化事例が数多くオープンになってくることで, 本技術をものづくりに上手く取り込もうとする新たなアイデアが多方面から生まれてくると考えている. 今後も当研究所は公設試験研究機関として, 金属 AM 技術の普及・発展に様々な側面から貢献していく所存である.

本研究の一部は, 国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「マッチングプランナープログラム」, および総合科学技術・イノベーション会議の SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「革新的設計生産技術」(管理法人: NEDO)の「三次元異方性カスタマイズ化設計・付加製造拠点の構築と地域実証」によって実施されたものである. また, ヒートシンクの伝熱性能実験では, ㈱ダイヘンの坪田龍介氏, 宮原寿朗氏, 清水友也氏に協力いただいた. ここに記して謝意を表する.

- (1) 米山 猛, 香川博之, 阿部 諭, 末廣栄覚: 精密工学会誌, **73** (2007), 1046-1050.
- (2) 酒井仁史: 素形材, **Vol. 54** No. 2(2013), 47-53.
- (3) D. A. Hollander, M. von Walter, T. Wirtz, R. Sellei, B. Schmidt-Rohlfing, O. Paar and Hans-Josef Erli: Biomaterials, **27**(2006), 955-963.
- (4) T. Nakamoto, N. Shirakawa, Y. Miyata and H. Inui: J. Mater. Process. Technol., **209**(2009), 5653-5660.
- (5) T. Nakamoto, N. Shirakawa, Y. Miyata and T. Sone: Surf. Coat. Technol., **202**(2008), 5484-5487.
- (6) T. Nakamoto, N. Shirakawa, K. Kishida, K. Tanaka and H. Inui: Int. J. Automation Technol., **6**(2012), 597-603.
- (7) 木村貴広, 中本貴之: 粉体および粉末冶金, **61**(2014), 531-537.
- (8) T. Kimura, T. Nakamoto, M. Mizuno and H. Araki: Mater. Sci. Eng. A, **682**(2017), 593-602.
- (9) W. Matthew, S. Tsopanos, J. Chris and O. Leuan: Rapid Prototyp. J., **13**(2007), 291-297.
- (10) T. Vilaro, S. Abed and W. Knapp: Proc. 12th European Forum Rapid Prototyp., AFPR, Paris, (2008).
- (11) N. T. Aboulkhair, N. M. Everitt, I. Ashcroft and C. Tuck: Additive Manuf., **1-4**(2014), 77-86.
- (12) N. Read, W. Wang, K. Essa and M. M. Attallah: Mater. Des., **65**(2015), 417-424.
- (13) K. G. Prashanth, S. Scudino, H. J. Klaus, K. B. Surreddi, L. Lober, Z. Wang, A. K. Chaubey, U. Kuhn and J. Eckert: Mater. Sci. Eng. A, **590**(2014), 153-160.
- (14) 北岡山治, 藤倉潮三, 神尾彰彦: 軽金属, **38**(1988), 426-446.
- (15) T. Kimura and T. Nakamoto: Mater. Des., **89**(2016), 1294-1301.
- (16) A. L. Kearney: ASM Handbook, 9. Aufl., 2. Bd., ASM International, Ohio, (1990), 152-177.
- (17) S. Tzeng and T. Jeng: Int. J. Heat Mass Transfer, **49**(2006), 1452-1461.
- (18) 岡崎圭佑, 山本光佑, 阪上雅昭, 千田 衛, 稲岡恭二: 日本機械学会論文集(B編), **79**(2013), 649-659.
- (19) 四宮徳章, 中本貴之, 木村貴広, 山口真平, 片桐一彰: 2016年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, 日本冷凍空調学会, (2016), A321-1-6.
- (20) <https://www.daihen-robot.com/items/synchro>
- (21) 木村貴広, 中本貴之: 軽金属, **66**(2016), 167-173.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
 中本貴之
 1997年 京都大学大学院工学研究科修士課程材料工学専攻修了
 1997年 松下電器産業(現パナソニック)株式会社 入社
 2004年 大阪府立産業技術総合研究所 入庁
 2010年9月 京都大学大学院工学研究科博士後期課程材料工学専攻修了 博士(工学)
 2017年4月 大阪産業技術研究所-現職
 専門分野: 積層造形, 粉末冶金
 ©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開発に従事。
 レーザ積層造形技術を利用したものづくり支援を中心に活動。
 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★



中本貴之 木村貴広 四宮徳章