

Dr. NAI Mui Ling Sharon

Senior Scientist,
Manufacturing Process Division
Singapore Institute of Manufacturing Technology

Dr. ナイ ムイ リン シャロン

シンガポール科学技術庁 製造プロセス研究所 主任研究員



Digitally-Enabled Materials and Additive Manufacturing Technologies for the Manufacturing Landscape

モノづくりの現場におけるデジタル化材料と付加製造技術

The development of new materials and processing methods has always been a core driver in the manufacturing industry. For decades, researchers have been mapping the relationships among composition, processing method, structure, properties, and performance for newly developed materials through time- and labour-intensive trial-and-error experiments. The typical cycle from material discovery to deployment ranges from 10 to 20 years. In order to accelerate the development process for new materials, material informatics strategies with data centric approaches are now increasingly being used ^{1), 2)}. This is facilitated through the development of high-throughput computational and combinatorial experiments. Data

analytics is one of the key enablers for accelerating material discovery and processing. The rapid advancement of data infrastructures and machine learning solutions in recent years is supporting this drive, and is resulting in a paradigm shift in materials science research and development. Materials informatics can generate “inverse models” for optimization and design, and can also produce “forward models” for predictive analytics ²⁾.

In addition to the emergence of materials informatics, the manufacturing sector is evolving towards digital manufacturing, with the manufacturing and assembly sectors increasingly relying on digital design and robotics technology to control the manufacturing processes. Moreover, new

新材料およびプロセスの開発はいつの時代も、製造業における中核となる原動力のひとつである。何十年の間、研究者は新規に開発した材料について、その組成、プロセス、構造、特性、性能の各要素間の関係を、非常に多くの時間と労力を費やし試行錯誤を重ねて調べてきた。そのため、材料の発見から実用化までは、一般的に10年から20年の年月がかかっていた。しかし最近では、新材料開発を加速するために、データ中心アプローチ型のマテリアルズインフォマティクスが使われることが多くなってきている^{1), 2)}。これはハイスループットな計算科学およびコンビナトリアル実験の開発によって可能になった。データ解析は、この材料・プロセス開発の加速を可能にする鍵のひとつである。近年のデータ基盤や機械学習ソリューションの急速な発展がこの動きを支えており、これにより材料科学の研究開発におけるパラダイムシフトがもたらされている。マテリアルズインフォマティクスでは、最適化とデザインにおいて「逆モデル」を、また予測分析に

おいて「順モデル」を生成させることができる²⁾。

マテリアルズインフォマティクスの登場に加えて、製造および組み立て部門が製造工程管理におけるデジタル設計およびロボット技術への依存度を増していき、製造部門のデジタル化が進んでいる。さらに、従来の材料よりもはるかに優れた特性を持つ、合金やハイブリッド材料、複合材料などの新たな材料が出現し、モノづくりの現場を一変させている。これらの新材料が部品や製造工程に組み込まれることで、新しい設計が生み出され、部品性能が改善される。その結果、新たな用途が開拓され、新しい作製方法および組み立て方法に価値が付加される。

デジタル製造システムに加えて製造技術が進歩したことにより、材料の形態や組成、構造が現在ではデジタル的に制御できる。これにより、複数素材から成る任意の形の部品の製造や、機能性の増強および用途拡大といった部品性能の調整が可能になる。3Dプリンティングとも言われる付加製造 (Additive Manufacturing:

materials (alloys, hybrid and composite materials) that have far superior properties to traditional materials, are emerging and changing the manufacturing landscape. These new materials will be integrated into components and manufacturing processes to generate new designs and improve component performance. This will give rise to new application opportunities and deliver added value to new fabrication and assembly methods.

With the advancement of manufacturing technology and the emergence of digital manufacturing systems, material morphology, composition and structure can now be digitally controlled. This allows users to manufacture freeform multi-material components and tailor their performance to provide an increasing range of functionalities and applications. Additive manufacturing (AM), also known as 3D printing, is one such digital manufacturing technique, and involves a layer-by-layer approach to fabricate freeform parts. It is also a valuable tool for materials innovation, and is instrumental in the transformation of product design and the manufacturing landscape. The layer-wise fabrication approach allows complex geometries to be produced, which is challenging using traditional manufacturing routes such as subtractive processing (turning,

milling etc.) or formative processing (casting, forging etc.). However, some material compositions used in traditional manufacturing are not suitable for AM, and modifications are required before they can be used. Moreover, metal AM parts are subjected to a complex cyclical thermal history comprising directional heat extraction, repetitive melting and very rapid solidification steps during AM fusion-based processes, resulting in anisotropic, heterogeneous and fine-grained microstructures. These AM microstructures differ significantly from those in products manufactured using traditional methods³⁾⁻⁶⁾. Thus, a thorough understanding of the relationships among processing conditions, structure, and properties is essential in order to increase the metal AM adoption rate.

The development of a new generation of alloys tailored for AM is vital for overcoming the above-mentioned challenges and for realising the full potential of AM, tapping into the uniqueness of each type of AM technology for new material development. Researchers have used combinatorial material science to create new alloy compositions with AM technologies (powder-bed fusion and direct energy deposition) to design and optimize metallic alloys and heterogeneous structures^{7), 8)}. High-entropy alloys

AM) 技術はこのようなデジタル製造技術の一種であり、造形層を重ねて任意の形の部品を作っていく積層造形もそのひとつである。またこれは材料のイノベーションに大いに役立つツールであり、製品設計およびモノづくりの現場を変えるものである。この、層を積み上げる作製方法では、除去加工(旋盤加工やフライス加工など)や成形加工(鋳造や鍛造など)といった従来の製造方法では困難だった複雑な形状が作製可能になる。しかしながら、従来の製造方法向けの材料組成ではAMに適さない場合があり、AMに使用する前に材料組成を変更する必要がある。さらに、AMは溶融を繰り返す工程であるため、AMで作製された金属部品は、指向性熱流や繰り返し溶融、急速凝固による複雑な熱履歴を何度も受け、不均質な異方性微細結晶粒組織となる。これらのAMによる微細組織は、従来の方法で作製されたものとは著しく異なる³⁾⁻⁶⁾。したがって、プロセス、構造、特性の各要素間の関係を徹底的に理解することは、金属AMの導入比率を上げる

ためには不可欠である。

新材料開発のためのAM技術それぞれの独自性を生かしながらAM用新世代合金を開発することは、上に述べた難題を克服し、AMの潜在能力を最大限生かすために極めて重要である。研究者は合金組成や不均質構造を設計し最適化するために、コンビナトリアル材料科学を用いて、AM技術(粉末床溶融結合法および指向性エネルギー堆積法)によって新しい合金組成を生み出してきた^{7), 8)}。ハイエントロピー合金(HEA)はAMの出現に大きく恩恵を受けている材料の一種であり、最近、研究者の多大な興味と注目を集めている^{4), 9)}。また、アルミニウム合金も大きな関心を集めている材料である。従来のアルミニウム基合金(例えば、Al_{2xxx}, Al_{6xxx}, Al_{7xxx}合金)の場合、レーザー加工の際に微細な亀裂が入る問題があり、プリンティングに使用するためには組成を調整する必要がある。HRLラボラトリーズ社およびElementum3D社は、優れた性能のプリンティング用アルミニウム合金に関する複

are one class of materials that have greatly benefited from the emergence of AM, and have recently been the subject of intensive research^{4), 9)}. Another class of materials that has received a great deal of interest is aluminium alloys. Traditional Al-based alloys (e.g., Al_{2xxx}, Al_{6xxx}, Al_{7xxx} alloys) have micro-crack issues during laser processing, and have to be compositionally modified to enable printability. HRL Laboratories and Elementum 3D are currently offering composite printable aluminium alloys with superior performance. Even for 3D printable materials such as iron-based or nickel-based alloys, the addition of ceramic reinforcements has shown to produce 3D printable composite materials with superior properties^{10), 11)}. Many more material alternatives will appear on the market as AM adoption gains traction.

It is also worth mentioning that the binder jetting process is attracting great interest due to its capability to 3D print highly porous structures using a wide range of materials (metals, ceramics, polymers and biomaterials), which is not easily achievable using fusion-based AM techniques. Mg-based alloys, which are lightweight and biocompatible, cannot be effectively processed by fusion-based AM, but have been successfully printed via binder jetting^{12), 13)},

targeting implant applications. In addition, the binder jetting process has increasingly been used to fabricate sand cores and moulds for casting industrial parts with complex shapes.

In the past decade, there have been significant advancements in computer-aided design, AM technology and materials science. In addition to the ability to customize material properties, this has opened up possibilities for developing smart materials and designs, to achieve outcomes such as self-assembled structures, self-repairing components and multi-functional/self-adaptable components. Smart materials are stimulus-responsive materials that respond in a programmable way to an external stimulus (such as temperature, light, humidity, pH, pressure, and electric and magnetic fields)^{14), 15)}. This class of materials enabled the emergence of 4D printing and has potential applications in implantable biomedical devices, tunable shock-absorbing interfaces, soft robotics and deployable aerospace structures. Future materials research should focus on forming a deeper understanding of how to control the microstructure, shape, yield and residual stress during processing, and on broadening the range of advanced AM materials. This knowledge can then be used to develop new integrated approaches for AM

合材料ソリューションを現在提供している企業である。鉄合金またはニッケル基合金等の3Dプリンティングが可能な材料にでさえセラミックスの添加は適切とされ、優れた特性を持つ、3Dプリンティングが可能な複合材料が得られることが実証された^{10), 11)}。AMの導入が増えるにつれ、選択肢となる材料が市場にさらに現れるだろう。

また、熔融によるAM法では容易にできない、空孔率が高い構造物を3Dプリンティングできることや、幅広い材料(金属やセラミックス、ポリマー、生体材料)を使用できるため、結合剤噴射法が大きな関心と注目を引き寄せていることについても言及しておきたい。軽量の生体適合性材料であるマグネシウム合金は、熔融によるAM法ではうまく加工することができないが、結合剤噴射法ではインプラント用途の加工に成功している^{12), 13)}。さらに、複雑な形状の工業部品の製造に使用する砂型中子や鋳型を造形するためにも、結合剤噴射法はますます使われるようになってきている。

この10年、コンピュータ支援設計(CAD)やAM技術、材料科学は著しく進歩した。この進歩によって、材料特性を所望のものに変更可能になったことに加え、自己組織化構造や自己修復部材、多機能・自己適応部材等を開発するための、スマートマテリアルやそれらの設計の開発に道が開かれた。スマートマテリアルとは刺激応答性材料のことであり、これは温度や光、湿度、pH、圧力、電場、磁場といった外部刺激に応答して、事前に設定した反応を示すものである^{14), 15)}。この種の材料によって4Dプリンティングが可能になり、埋め込み型医療用デバイスや調整可能な衝撃吸収材料、ソフトロボティクス、展開可能な宇宙構造物等への応用可能性が見えてきた。これからの材料研究は、微細構造や形状、加工中の降伏応力や残留応力の制御方法についての理解を深め続け、また、先進的なAM材料の幅を広げ続けなければならない。そして得られた知見によって、複数素材から成る構造物や傾斜機能材料のAMプロセスに向けた新しい総合的な方法が開発されるだろう。

processing of multi-material structures and functionally graded components.

Besides AM materials and processing developments, there is a need to look at the entire integrated end-to-end AM workflow for industrialization. AM is a digital transformation technology and represents an ideal opportunity to apply the digital thread concept to scale operations by linking processes together via data analysis, from design concept to finished parts. Using the information obtained, manufacturers can better assess the quality and performance of products, and adjust their design accordingly¹⁶⁾.

For the above exciting, multi-disciplinary research and developmental work to be successfully translated into industrial applications, close public-private partnerships need to be forged between various research entities with different competencies and industry players. There must be a collective effort to align problem statements, leverage resource pools (talent, knowledge and facilities), and increase the readiness level of technology, manufacturing, business and the ecosystem, in order to accelerate the successful and timely commercialization of developed technologies.

AM材料およびプロセスの開発だけでなく、産業化のためのAMワークフローの隅から隅まで、全体に注意を向ける必要がある。デジタルトランスフォーメーション技術の一種であるAMは、設計の構想段階から製品の完成までの各プロセスをデータ解析によってつなげることでオペレーションを調整する、デジタルスレッドに好適である。デジタルスレッド全体から集められた情報を基に、製造者は製品の質と性能をより適切に判断し、それに応じて製品の設計を変更することができる¹⁶⁾。

これまでに述べた心躍る学際的研究開発が無事産業化されるためには、産業界の研究機関のみならず、異なる強みを持ったさまざまな研究機関の密接な官民連携が必要である。開発技術のタイムリーな実用化を無事に加速させるためには、取り組むべき問題を明確にし、人材や知識、設備のリソースプールを活用し、技術や生産体制、ビジネス、エコシステムの準備態勢レベルを上げるために結集して努力する必要がある。

References

- 1) Ramakrishna S., Zhang T. -Y., Lu W. -C., Qian Q., Low S. C., Yune J. H. R., Tan D. Z. L., Bressan S., Sanvito S., Kalidindi S. R., "Material informatics", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 30, 2019, 2307 - 2326.
- 2) Agrawal A., Choudhary A., "Perspective: materials informatics and big data: realization of the "fourth paradigm" of science in materials science, *APL Materials*, Vol. 4, 2016, 053208.
- 3) Kok Y., Tan X. P., Wang P., Nai M. L., Loh N. H., Liu E., Tor S. B., "Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review", *Materials & Design*, Vol. 139, 2018, 565 - 586.
- 4) Zhu Z. G., An X. H., Lu W. J., Li Z. M., Ng F. L., Liao X. Z., Ramamurthy U., Nai S. M. L., Wei J., "Selective laser melting enabling the hierarchically heterogeneous microstructure and excellent mechanical properties in an interstitial solute strengthened high entropy alloy", *Materials Research Letter*, Vol. 7, Issue 11, 2019, 453 - 459.
- 5) Zhu Z. G., Li W. L., Nguyen Q. B., An X. H., Lu W. J., Li Z. M., Ng F. L., Nai S. M. L., Wei J., "Enhanced strength-ductility synergy and transformation-induced plasticity of the selective laser melting fabricated 304L stainless steel", *Additive Manufacturing*, Vol. 35, 2020, 101300.
- 6) Poorganji B., Ott E., Kelkar R., Wessman A., Jamshidinia M., "Review: materials ecosystem for additive manufacturing powder bed fusion processes", *JOM*, Vol. 72, No. 1, 2020, 561 - 576.
- 7) Li Z. M., Ludwig A., Savan A., Springer H., Raabe D., "Combinatorial metallurgical synthesis and processing of high-entropy alloys", *Journal of Materials Research*, Vol. 33, Issue 19, 2018, 3156 - 3169.
- 8) Knoll H., Oeylok S., Weisheit A., Springer H., Jäggle E., Raabe D., "Combinatorial alloy design by laser additive manufacturing", *Steels Research International*, Vol. 87, 2017, 1 - 11.
- 9) Wang P., Huang P. F., Ng F. L., Sin W. J., Lu S. L., Nai M. L., Dong Z. L., Wei J., "Additively manufactured CoCrFeNiMn high-entropy alloy via pre-alloyed powder", *Materials & Design*, Vol. 168, 2019, 107576.
- 10) Zhang B. C., Bi G. J., Wang P., Bai J. M., Chew Y. X., Nai M. L., "Microstructure and mechanical properties of Inconel 625/nano-TiB₂ composite fabricated by LAAM", *Materials and Design*, Vol. 111, 2016, 70 - 79.
- 11) Zhai W. G., Zhu Z. G., Zhou W., Nai M. L., Wei J., "Selective laser melting of dispersed TiC particles strengthened 316L stainless steel", *Composites Part B*, vol. 199, 2020, 108291.
- 12) Salehi M., Maleksaeedi S., Nai M. L., Meenashisundaram G. K., Gupta M., "A paradigm shift towards compositionally zero-sum binderless 3D printing of magnesium alloys via capillary-mediated bridging", *Acta Materialia*, Vol. 165, 2019, 294 - 306.
- 13) Salehi M., Maleksaeedi S., Sapari M. A. B., Nai M. L., Meenashisundaram G. K., Gupta M., "Additive manufacturing of magnesium-zinc-zirconium (ZK) alloys via capillary-mediated binderless three-dimensional printing", *Materials & Design*, Vol. 169, 2019, 107683.
- 14) Mitchell A., Lafont U., Holyńska M., Semprinoschnig C., "Additive manufacturing - a review of 4D printing and future applications", *Additive Manufacturing*, Vol. 24, 2018, 606 - 626.
- 15) Momeni F., Mehdi S. M., Hassani N., Liu X., Ni J., "A review of 4D printing", *Materials & Design*, Vol. 122, 2017, 42 - 79.
- 16) <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/public-sector/articles/digital-thread.html>