

1. 高度ガスタービン技術の用途

ガスタービン技術は民間および軍事用途の両方で極めて重要な技術として認識されてきた。しかし、いくつかの先端科学技術が軍事用途から派生したのに対して、ガスタービン技術に限って言えば、その投資の傾向や市場規模は圧倒的に民間用途が優っており、多くの技術革新が民間企業を中心に行われてきたことがわかる。中でも航空機エンジンへの投資が最も多い。2004年のデータではあるが、ガスタービンの全体の生産額 219 億米ドル (USD21.9 billion)のうち、航空機向けのガスタービン事業が 149 億ドル(USD14.9 billion)にのぼり、全体の 2/3 近くの生産額を占めていることがわかる。またそのうち、37 億ドル(USD3.7 billion)が軍事用途の航空機、112 億ドル(USD11.2 billion)が民生用途の航空機向けであり、ここからも明らかに民間向けのガスタービンが主な比重を占めていることがわかる¹¹⁷。

また 2009 年以降のガスタービンの世界市場を概観すると、圧倒的に航空機用のガスタービン、その中でも民間機用のものがその市場の大半を占めることがわかる(図 23)。航空機用途以外のガスタービンは全体の 1/5 以下の市場規模であり、軍用機向けのものに限っては、1/10 程の市場規模でかつこの 10 年で市場規模の推移もほぼ横ばいである。一方で民間航空機向けのガスタービン市場は 2009 年からのこの 10 年で倍近く拡大しており、この先 10 年も拡大していくことが予想されている。

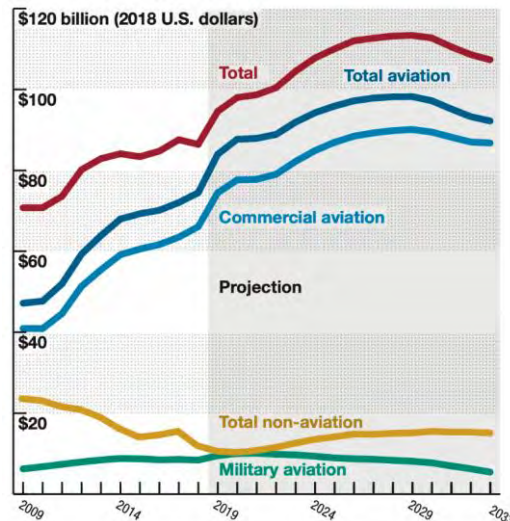


図 3-2 ガスタービン世界市場の推移¹¹⁸

¹¹⁷ Tony Giampaolo, *Gas turbine handbook: Principles and practice, Fifth Edition*. (London and New York: Routledge, 2014): 327.

¹¹⁸ Committee on Advanced Technologies for Gas Turbines Aeronautics and Space Engineering Board Division on Engineering and Physical Sciences, *Advanced technologies for gas turbines*. (Washington, DC.: The national Academies Press, 2020): 13.

(1) 公的利用・安全保障における利用

一般軍用機

軍事用途に用いられるガスタービン技術は、主に戦闘機や戦艦等のエンジン向けのものが多い。例えば米国空軍が保有する F35 統合打撃戦闘機(ロッキード・マーチン製)に搭載されたプラット・アンド・ホイットニー社製造の F135 エンジンがその典型である¹¹⁹。プラット・アンド・ホイットニー社は米国の GE アビエーション社と英国のロールスロイス社に次ぐ、航空機用エンジンの最大手であり、軍事用途から民生用途に至るまで幅広い種類のガスタービンエンジンの製造を手掛けている¹²⁰。F135 ジェットエンジンは、F35 戦闘機の異なる種類の形態に対応している。滑走路からの離着陸(CTOL)をする F-35A、短い滑走路から離着陸する(STOVL)F-35B および空母からの離着陸(CV)をする F-35C 等様々な機体に対応できるようになっている¹²¹。

また英国ロールスロイス社は戦艦や空母向けのガスタービンエンジンを開発・販売している。中でも MT30 Marine Gas Turbine は同等クラスにおける従来のモデルの半分の部品で構成されていることからメンテナンスコストを最小限に抑えることに成功したモデルである。40kn を超えるトップクラスのスピードを誇り、2008 年から米国海軍の沿海域戦闘艦(LCS)のエンジンとしても採用されている。このように軍事産業におけるガスタービン技術開発においては民間企業における技術開発が大きな比重を占めていることがわかる。

一方で、こうした大手ガスタービン企業と政府との関係性にも注目しておく必要があるだろう。確かに、ガスタービンの市場は民生用途を中心に発展してきたが、(Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA)をはじめ、米国政府の政府系研究機関もこうした先端ガスタービン技術の投資を積極的に実施してきた。DARPA は「バルカン高度推進エンジンプログラム」(Vulcan Advanced Propulsion Program)を進めており、2010 年にはこのプログラムのフェーズ 2 として、プラット・アンド・ホイットニー社が Constant Volume Combustion (CVC) engine technology の開発のために、DARPA から 3,380 万ドル(USD33.8 million)もの契約を獲得している¹²²。CVC エンジンサイクルは従来のブレイトンサイクルよりも格段に効率的に燃料の燃焼を継

¹¹⁹ Pratt &Whitney, “F135: The world’s most advanced flight engine.”

<https://prattwhitney.com/products-and-services/products/military-engines/f135>

¹²⁰ Pratt &Whitney HP, <https://prattwhitney.com>

¹²¹ Giampaolo, *Gas turbine handbook*: 327.

¹²² *Cision PR Newswire*, P&W awarded \$33.8 million DARPA contract for new engine technology development. October 12 2010. <https://www.prnewswire.com/news-releases/pw-awarded-338-million-darpa-contract-for-new-engine-technology-development-104762719.html>

続的に行える技術であり、戦闘機のジェットエンジンや戦艦のエンジン向けの展開が期待されている¹²³。



図 3-3 左 : F35 戦闘機向け F135 エンジン(Pratt & Whitney 製)



図 3-4 右 : MT30 Marine Gas Turbine (Rolls Royce 製)

原子力潜水艦

大半の軍事用途のガスタービンは、戦闘機や戦艦・空母向けに製造される一方で、潜水艦の中でも原子力潜水艦に限って高度なガスタービン技術が要求されることも重要なポイントである。従来の潜水艦はディーゼルエンジンを用いて推進するが¹²⁴、核エネルギーを利用して推進する原子力潜水艦では原子力発電同様ガスタービンが搭載されている。この従来の潜水艦と原子力潜水艦との間の仕様の違いは、ガスタービン技術の安全保障上の重要性を極めて高いものにしてきた。

¹²³ Bechtel, “Constant volume combustion: the ultimate gas turbine cycle.” *Gas Turbine World* (Nov. - Dec. 2013).

¹²⁴ Rolls Royce, mtu submarine engines. <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/applications/defense/marine-defense-solutions/submarines.html>

こうした中で、英国や米国は原子力潜水艦の製造と運用にとりわけ力を入れてきた。例えば、英国ロールスロイス社は長年に渡って、英国海軍の原子力潜水艦の製造を担ってきた歴史がある¹²⁵。また米国では、ジェネラル・ダイナミクス社 (General Dynamics)の子会社であるジェネラル・ダイナミクス社・エレクトリック・ボート社(General Dynamics Electric Boat)が米国海軍への潜水艦納入で100年以上の歴史を有しており、原子力潜水艦の設計・製造も手掛けている¹²⁶。

また2021年には英米豪の3カ国の間で軍事同盟AUKUS締結され、英国と米国がオーストラリアの原子力潜水艦の開発を支援することとなった。AUKUSの枠組みはインド太平洋地域への関与を深めたい英国と既存の当該地域においてリベラルな国際秩序を維持したい米国とオーストラリアとの間で結ばれた同盟であり、英国の全面的な支援によるオーストラリアの原子力潜水艦開発は当該地域のパワーバランスに大きな影響を与える可能性が高いと示唆されてきた¹²⁷。

AUKUSの締結とオーストラリアの原子力潜水艦開発におけるガスタービン技術の重要性はメディアではあまりフォーカスされてこなかったが、経済安全保障及び軍事安全保障の両面で重要なインプリケーションをもたらす可能性が高い。前述の通り、原子力潜水艦の場合は、原子炉を搭載し、ガスタービンを用いてそのエネルギーを創出する点において、ディーゼルエンジンで駆動する従来の潜水艦とは異なる。この意味でも、原子炉技術に加えて、ガスタービン技術の安全保障上の重要性も益々高まっていくことが予想される。憶測の域をこえないが、2022年8月に米国がガスタービン技術を含む「新興根幹技術」の輸出規制強化が発表された背景には、こうした原子力潜水艦とそれにつながるガスタービン技術の重要性が増したことがあるようにも思われる¹²⁸。

(2) 民生利用

航空機向けガスタービンエンジン

¹²⁵ Rolls Royce, We power the UK Royal Navy's nuclear submarine fleet. <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/defence/submarines.aspx>

¹²⁶ General Dynamics Electric Boat, Our submarines. <https://www.gdeb.com/about/oursubmarines/>

¹²⁷ 朝日新聞「米英、豪の原子力潜水艦保有を支援へ 中国念頭に新たな安保の枠組み」(2021年9月16日)
<https://www.asahi.com/articles/ASP9J32W1P9JUHB1002.html>

¹²⁸ David Shepardson, U.S. tightens export controls on advanced chip, gas turbine engine tech. *Reuters*. August 12, 2022. <https://www.reuters.com/markets/us/us-heightens-export-controls-advanced-chip-gas-turbine-engine-technologies-2022-08-12/>

航空機向けのガスタービン技術の研究開発及び製造は、主に米国の GE アビエーション社、プラット・アンド・ホイットニー社(Pratt & Whitney)そして英国のロールスロイス社の 3 社が中心となって担ってきた。陸海空の輸送運搬技術の中でも特に空輸は最も多くエネルギーを有する(図 24)。航空機向けのガスタービン技術開発では、主に燃料燃焼の効率性の向上が課題とされてきた。過去半世紀を見ても民間航空機向けのエンジンの燃焼効率は飛躍的に改善されていることがわかる(図 25)。近年では、従来のターボファンエンジンと比較して 25%の燃費向上が米国を中心に業界の開発目標とされてきた¹²⁹。ジェットエンジンの推進効率は理論上 FPR(Fan Pressure Ratio)によって決まると理解されており、FPR が低い程高い推進効率を発揮する。そのため、航空機向けのガスタービン技術においてはより低い FPR を実現するためのタービンの設計が次なる技術開発の目標とされてきた¹³⁰。

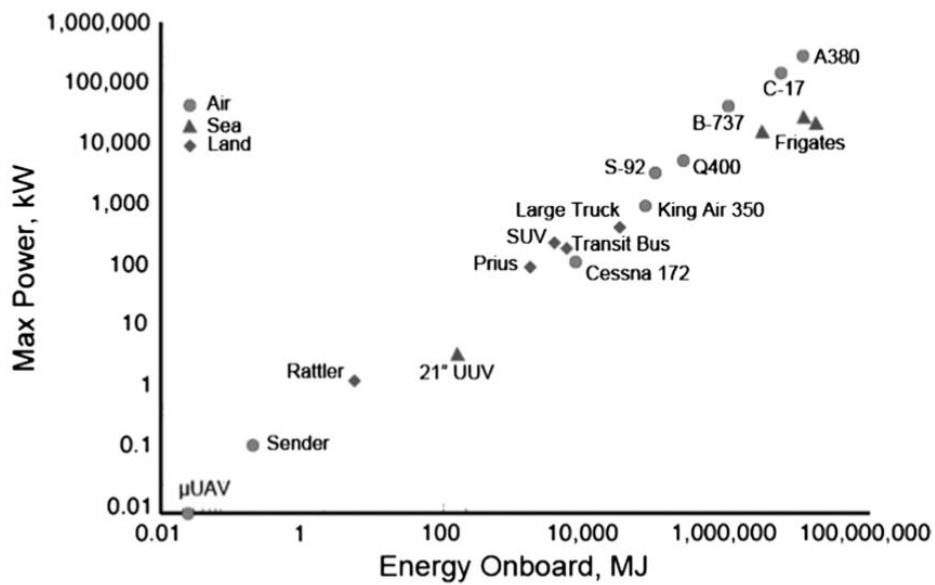
民間航空機向けのガスタービンのもう一つの重要な課題は、二酸化炭素(CO₂)排出量の削減である。気候変動がグローバルな課題として世界各国で認識される中、我々の生活で国境を超えて人やモノを輸送する航空機が排出する CO₂ の量は無視できるものではない。2019 年のデータによると、世界中の航空機が 1 年間で排出した CO₂ の量は、915 百万トンに及び、これは陸海空すべての交通輸送において排出された全体 CO₂ の 12%に相当する¹³¹。こうした中で、ガスタービンそのものの燃焼効率とともに、ここ 10 年の間に二酸化炭素排出量の削減に向けた技術革新も求められるようになった¹³²。

¹²⁹ *ibid.*

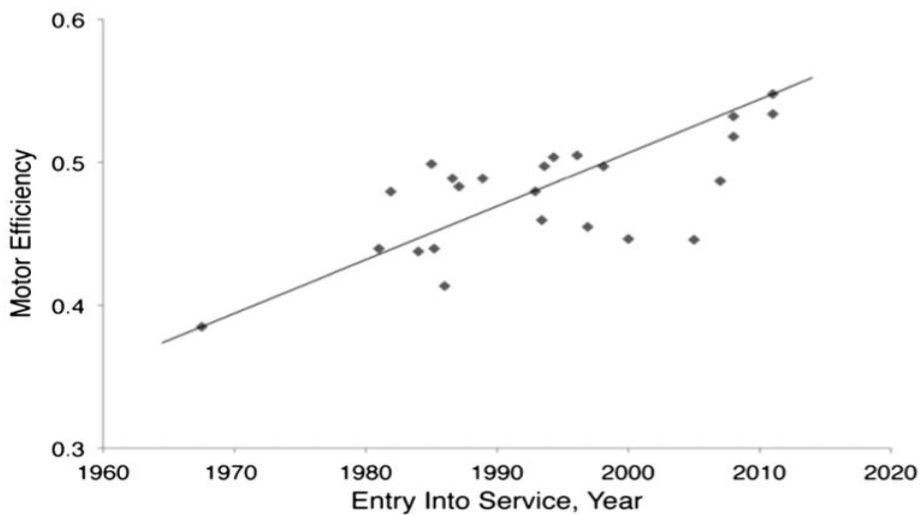
¹³⁰ Alan H. Epstein, “Aeropropulsion for Commercial Aviation in the Twenty-First Century and Research Directions Needed.” *AIAA Journal* 52(5) (2014).

¹³¹ Air Transport Action Group, “Fact & Figures.” <https://www.atag.org/facts-figures.html>

¹³² Epstein, “Aeropropulsion for Commercial Aviation.



(図 3-5 陸海空輸送におけるエネルギー出力¹³³)



(図 3-6 民間用ターボファンモーターの効率性¹³⁴)

発電用ガスタービン技術

ガスタービン技術のもう一つの大きな民間用途は、電力発電所向けの大型ガスタービンである。ガスタービン国際市場の予測によると、この先 2030 年までにガスタービンを用いた電力発電事業は、合計 USD107,705.00 規模にのぼると予想されている。発電用ガスタービン事業の大手 3 社である GE(米国)、シーメンス(ドイツ)、三菱パワー(日本)は、コスト削減と生産プロセスの

¹³³ ibid.: p. 902.

¹³⁴ Ibid.

最適化を図るべく大幅な構造再編を進めており、各社とも今後更なる技術革新に向けた準備を進めている¹³⁵。

発電用のガスタービン開発において、発電の効率性は歴史的にも重要な課題とされてきた。1939年に開発された最初のガスタービンの熱効率は18%程度であったが、その後コンバインド・サイクルガスタービン(CCGT)が開発されて以降、2010年には熱効率60%超を達成した¹³⁶。この10年でさらに効率化が進められ、CCGTで70%の熱効率を達成することが目標とされてきた¹³⁷。また、熱効率の向上と共にCO₂排出量の削減も大きな課題とされ、特に、再生可能エネルギー資源を含む多様な燃料に対応できるようにタービンを設計することが要求されてきた。例えば、CO₂排出量の削減が期待されている水素燃料を含む気体燃料を燃焼できるタービンの設計が進められる等、多様な燃料資源に対応したガスタービンのデザインが進められている¹³⁸。中でも従来の天然ガス等の燃料に水素を混合させることで、CO₂排出量を大幅に削減できることが実証されており(図3-7)、ガスタービンメーカー大手もこうした水素燃料に対応したガスタービンの設計と製造に着手してきた。例えば、独シーメンス・エナジー社はすでに米国や欧州、中国、アフリカを含む世界各国で、水素燃料を含むガスタービンの運転を開始しており、CO₂の効果を実証してきた¹³⁹。

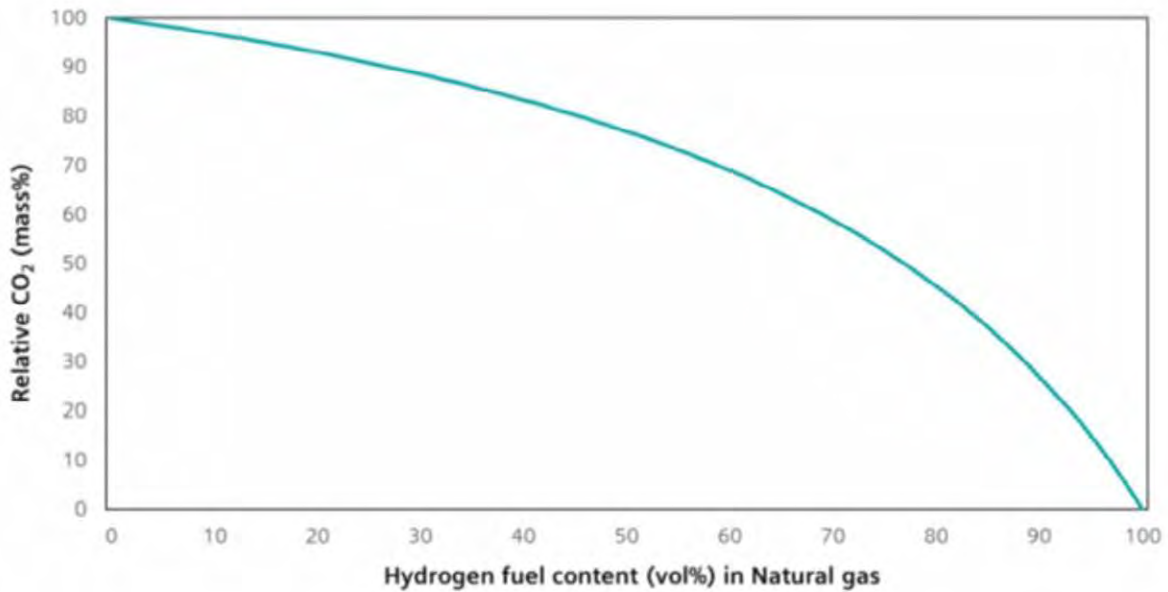
¹³⁵ Carter Palmer, “World Market Report: Gas turbine sales forecast for the coming decade.” *The Global Journal of Energy Equipment: Turbomachinery International (Handbook 2022)*, 62 (6). (2022). <https://cdn.sanity.io/files/0vv8moc6/turbomag/43c4c7f7f10572fbb07cfd74b3a596bf6bc9307d.pdf/TRB%20handbook%202022.pdf>

¹³⁶ *Power Engineering International*, Gas Turbines breaking the 60% efficiency barrier. May 1st 2010. <https://www.powerengineeringint.com/coal-fired/equipment-coal-fired/gas-turbines-breaking/>

¹³⁷ Committee on Advanced Technologies for Gas Turbines Aeronautics and Space Engineering Board Division on Engineering and Physical Sciences, *Advanced technologies for gas turbines*.

¹³⁸ *ibid.*

¹³⁹ Siemens Energy, *Hydrogen power and heat with Siemens Energy gas turbines*. (Siemens Energy, 2022):



(図 3-7 天然ガスへの水素の混合割合と CO₂ 排出量との相関関係¹⁴⁰⁾)

ガスタービン市場を取り巻く地政学

2022 年 2 月のロシアによるウクライナ侵攻は、ガスタービン市場にも大きな打撃を与えている。エネルギー市場における「脱ロシア化」の影響は、ガスタービン大手 3 社にも及んでおり、例えば、シーメンスの子会社であるシーメンス・エナジー(Siemens Energy)は、2022 年 10 月にロシアでのガスタービン事業のジョイント・ベンチャー(JV) Siemens Gas Turbine Technologies (SGTT)を地方政府が所有する企業 InterRAO 社に売却することを発表。事業の脱ロシア化に大きく舵を切り始めた¹⁴¹⁾。

ロシアに親和的な国の中には継続してガスタービンを供給している国もある。欧米による対ロシア経済制裁の中、イランはモスクワに対して 40 基のガスタービンを供給することを発表している¹⁴²⁾。また、いくつかの欧米各国の中でも対ロシアのガスタービン分野における投資を経済制裁の対象から例外的に除外するケースも見られている。例えば、カナダは欧州のエネルギー

¹⁴⁰ ibid.: 4.

¹⁴¹ Reuters, “Siemens Energy sells Russia-based gas turbine JV to local state firm.” October 12th, 2022. <https://www.reuters.com/markets/deals/siemens-energy-sells-majority-stake-russia-based-joint-venture-2022-10-14/>

¹⁴² Iran International, “Iran to provide Russia with 40 turbines to Help its gas sector.” October 24th 2022. <https://www.iranintl.com/en/202210244570>

危機を背景に、「欧州へのエネルギーの安定供給の維持」のためにロシアに対するガスタービン供給を例外的に認める措置を講じた¹⁴³。

西側諸国がロシアへの経済制裁とガスタービン事業の撤退を進める中で、エネルギー供給における欧州のロシア依存は、ガスタービン市場におけるアンビバレントな地政学環境を生み出している。このように、電力発電向けのガスタービン技術そのものが軍事転用される可能性は低いものの、ガスタービン供給が持つ政治的そして外交上の影響力は極めて大きいものであり、こうしたガスタービン事業のステークホルダーは、各国の地政学的利害と国境を超えたエネルギー共有の安定という複雑性の狭間で、極めて慎重な意思決定を迫られていると言えるだろう。

2. 要素技術

熱効率向上、CO₂ 排出量そしてメンテナンスコスト削減等を実現していく上で、ガスタービン開発には様々な技術要求が求められてきた。こうした技術要求に応じるために、様々なサブカテゴリの先端技術が応用されてきた。最後にガスタービンの技術開発に貢献が期待されてきた先端科学技術について解説する。

先端素材科学

ガスタービンに用いられる素材はその要求に応じて多様である。例えば、ガスタービンのファン・ブレードだけを見ても、航空機向けのブレードには「合成ポリマー」が用いられる一方で、極度に高温な環境での耐久性が求められる高圧ガスタービンのブレードには、「単結晶ニッケル合金」が用いられる¹⁴⁴。また物質・材料研究機構と横浜国立大学の研究チームは高速で亀裂を修復する「自己治癒セラミックス」を航空機のガスタービン向けに開発しており、航空機のエンジンが作動する 1000°C で、最速 1 分で亀裂を修復することが実証されている¹⁴⁵。

このように、ガスタービンの技術革新が進む中で、そうした極度環境でも耐え得る素材の供給が重要となる。電力発電向けのガスタービンを見ても 1990 年代には 540°C の要求仕様だった温度要件が、熱効率が向上するのと同時に上昇し、2010 年代には 600°C を超える温度要件が仕様

¹⁴³ *The Guardian*, “Canada exempts Russian gas turbine from sanctions amid Europe energy crisis.” July 10th, 2022. <https://www.theguardian.com/world/2022/jul/10/canada-exempts-russian-gas-turbine-from-sanctions-amid-europe-energy-crisis>

¹⁴⁴ Bakana, et al., “High-temperature materials for power generation in gas turbines.” I

¹⁴⁵ 物質・材料研究機構・横浜国立大学・科学技術振興機構「高速で亀裂が完治する自己治癒セラミックスを開発 ～骨の治癒がヒントに！フライト中にヒビを治す航空機エンジン用部材の実現へ大きな一歩～」（平成 29 年 12 月 21 日）<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20171221/index.html>

に盛り込まれるようになってきた¹⁴⁶。こうした温度要件に対してはより融点の高いチタン合金が用いられる等、タービンそれ自体の技術革新に応じて、用いられる先端素材も変化してきた¹⁴⁷。

しかしながら、タービンそれ自体の機能が高度化するのに対して、それらの要件を十分満たし得る素材の発見は未だ困難を極めている¹⁴⁸。こうした中で、テキサス A&M 大学の素材科学工学部の研究チームは、米国エネルギー省傘下の Ames National Laboratory¹⁴⁹と共同で、AI を用いて、極度の高温環境でも適応できる「高エントロピー合金」(High-Entropy alloys: HEAs) を推定するフレームワークを開発している。この AI 技術によって高度ガスタービン開発に適した素材を発見・特定するためのコストと時間を大幅に削減できると期待されている¹⁵⁰。

AM 技術(Additive Manufacturing)

3D プリンティング技術に代表されるアディティブ・マニュファクチュアリング(AM)技術もガスタービンの設計思想とその製造に革新をもたらしてきた。AM 技術の発展によってガスタービンの製造に要する工程とコストが格段に減少したことが報告されており、ガスタービンを製造する企業の多くは、ファンブレードの製造を目的とした 3D プリンターの導入を進めている¹⁵¹。例えば、独シーメンス社は AM 技術のプロバイダーである EOS 社との共同プロジェクトで 3D プリンター技術によってガスタービンの部品を製造できることを実証済みであり¹⁵²、AM 技術を用いた

¹⁴⁶ Power Engineering International, "Gas Turbines breaking the 60% efficiency barrier." "

¹⁴⁷ Young-Won Kim and Dennis M. Dimiduk. "Progress in the understanding of gamma titanium aluminides." *JOM* 43(8) (1991): 40-47.

¹⁴⁸ Michelle Revels, "Discovering materials for gas turbine engines through efficient predictive frameworks." *Wevolver* (August 22nd, 2022). <https://www.wevolver.com/article/discovering-materials-for-gas-turbine-engines-through-efficient-predictive-frameworks>

¹⁴⁹ <https://www.ameslab.gov>

¹⁵⁰ Saucedo, Daniel, et al. "High throughput exploration of the oxidation landscape in high entropy alloys." *Materials Horizons* 9(10) (2022): 2644-2663.

¹⁵¹ Michael Aller, "Advanced materials and processes of generation of gas turbine design." *Power Engineering* (September 21st, 2016). <https://www.power-eng.com/coal/advanced-materials-and-processes-for-the-next-generation-of-gas-turbine-design/#gref>

¹⁵² EOS, "Success story siemens3D printing for gas turbine blade." <https://www.eos.info/en/all-3d-printing-applications/production-and-industry/turbomachinery-turbines>

ガスタービンの製造を進めている¹⁵³。英ロールスロイス社も航空機向けのガスタービン事業で3Dプリンターによってガスタービンの部品を製造することを進めている¹⁵⁴。このように、AM技術は発電所用及び航空機用の両方で、ガスタービン製造技術の向上とコスト削減に大きく貢献することが今後ますます期待されていると言って良いだろう。

3. まとめ

ガスタービン技術は、電力発電や潜水艦といった我が国の広義の安全保障の根幹に関わる極めて重要な技術である。一方で市場規模を見れば、航空機産業におけるガスタービン市場が大きなパイを占めており、民生技術としても極めて有益な技術であることがわかる。日本のガスタービン技術は、三菱重工業を始めとした重電メーカーの技術開発が功を奏して、かなり高い技術レベルを維持していると言って良いだろう。また、アスタミューゼ社の調査から、大半の技術領域において、研究者数が増加傾向にあるのに対して、ガスタービン技術の研究者が世界的に減少傾向にあるということがわかった。こうしたことから、今後日本が当該技術領域で質と量の両面で強いイニシアティブを発揮する余地があるように思われる。特に米国はもちろん、優れた民間技術を有する英国等との技術パートナーシップを積極的に進めていくことが重要になるだろう。

¹⁵³ Siemens, “Additive Manufacturing: Siemens uses innovative technology to produce gas turbines.” December 13th 2018. <https://press.siemens.com/global/en/feature/additive-manufacturing-siemens-uses-innovative-technology-produce-gas-turbines>

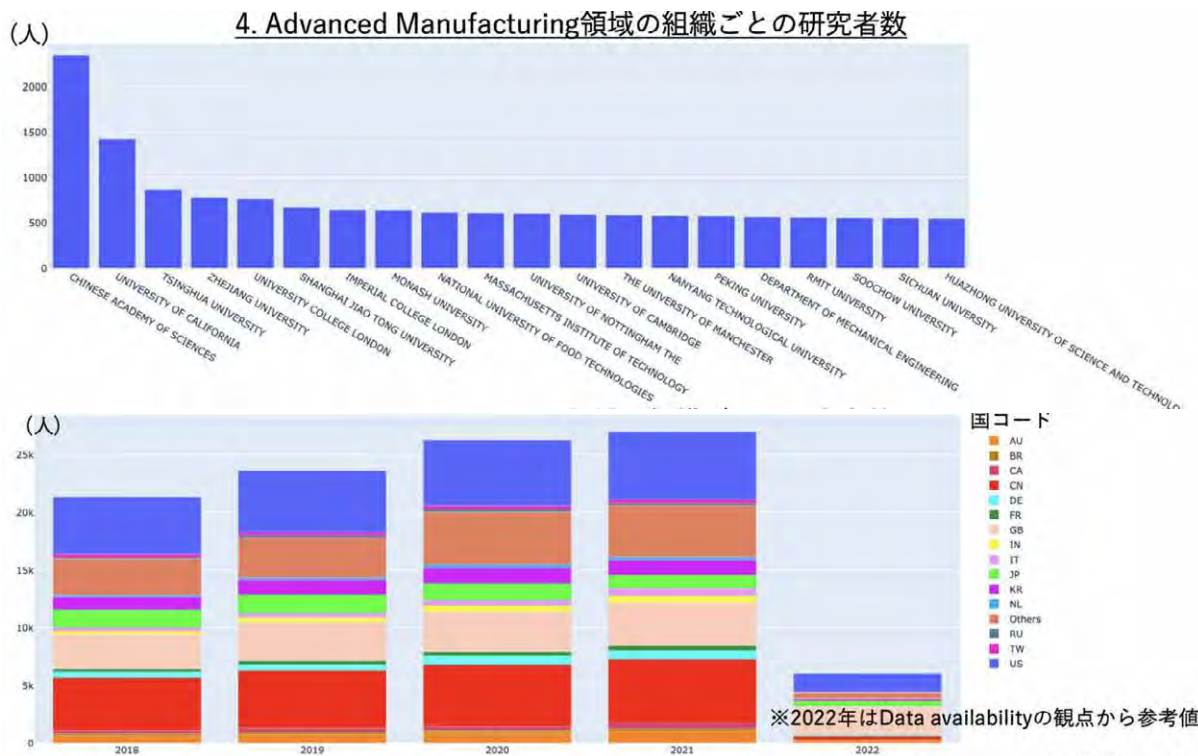
¹⁵⁴ Rolls Royce, “3-D printed parts and new materials help Rolls-Royce to engine test success”. October 11st, 2018. <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/11-10-2018-3-d-printed-parts-and-new-materials-help-rolls-royce-to-engine-test-success.aspx>

第4節 先進製造技術 (Advanced Manufacturing)

米国のオバマ元大統領は、2011年に先進製造技術の開発を重視する方針を示し、産官学の一体となった連携が必要であるとして Advanced Manufacturing Partnership (AMP: 先進製造技術パートナーシップ) を立ち上げた。ここでいう「先進製造」とは、「情報・オートメーション・コンピュータ計算・ソフトウェア・センシング・ネットワーキング等の利用と調整に基づき、物理学・ナノテクノロジー・化学・生物学による成果と最先端材料を活用する一連の活動」を指し、既存製品の新方法による製造と新技術による新製品の製造の両方を含む。AMP が立ち上げられた背景には、国際的な競争力を失いつつある米国の製造業事情があった。ロボット工学ではアジア諸国が勢いを強め、スマート製造やナノ製造などの先進技術の国際競争は日に日に高まるばかりだ。

日本においても先進製造技術の開発は大きな課題となっている。労働人口が減少していくなか、製造業のスマート化や効率の向上は必至だ。また、安全保障に関わるインフラから日常利用にいたるまで、生活に欠かせない存在となっている半導体についても、極小のナノ半導体チップの開発が進むなど、先進製造技術によって新しい局面を迎えている。

先端製造技術 (Advanced manufacturing) は、アディティブ・マニュファクチャリング (Additive Manufacturing: 以下 AM 技術) あるいは 3D プリンティング技術に代表される先端科学技術である。特に航空機やロケットのエンジン、ガスタービンの製造、近年では軍事分野における武器製造等、緻密で高度なデザインの製品をより効率的に低コストで製造することに長けた技術である。また、先端製造技術は、他の先端科学技術領域と極めて親和性が高い技術分野であり、米国や英国、そして近年では中国を中心に研究開発が進められてきた分野である。全体として、当該領域の研究者数は世界レベルで見ると増加傾向にあり、特に米国と中国での研究者数の伸びが顕著である。組織別の在籍者数で見ると、中国科学院 (Chinese Academy of Sciences) が圧倒的に多いことがわかる(図 4-1)。本章では、主に AM 技術とその複合領域とのシナジーに加え、ナノマニュファクチャリング技術 (Nanomanufacturing) について分析・解説をする。



(図 4-1 Advanced Manufacturing 領域の組織ごとの研究者数¹⁵⁵⁾

1. アディティブ・マニファクチャリング (Additive Manufacturing: AM)

アディティブ・マニファクチャリング (AM) は、素材となる金属を積層することで、さまざまな形状を作り出す加工技術である。一般的に 3D プリンティング技術と呼ばれるこの技術は、様々な製造分野で技術革新を齎している先端科学技術である。AM 技術は自由自在に金属を加工切断できるのみならず、製品内部の複雑な設計構造を再現できるため、一品ものの製品の製造に利用されることが多い。製造時間やコストが大幅に短縮されるほかことから各種製造分野で実用化が進んでい

2014 年にコンサルティング会社のプライスウォーターハウスクーパース (PwC) がまとめた調査によれば、実に米製造業の 66.7% が試作や最終製品の製造を問わず、何らかの形で 3D プリンタを活用しているという報告がされている。現在、この趨勢はさらに加速し、2017 年の調査では、2023 年までにスペア部品供給業者の 85% が 3D プリントをビジネスに組み込む予定となると予想されている。米政権の姿勢と軌を一にした産業構造の転換が起きているのである。世界的にもコロナ禍や米中経済摩擦による輸出の減少により、3D プリント産業は興隆しており、Reports and Data 社の 2020 年の調査報告書によれば、3D プリンタの材料市場は 2019 年の 4.5 億ドルから 2027 年に 27 億ドルまで急増すると見込んでいる。

¹⁵⁵ アスタミューゼ社再委託レポート

3D プリンタの産業面での活用も、ジェットエンジン、ロケットエンジン、住宅、自動車、航空機、ガスタービンといったものから、食品・靴・医療用人工骨・タイヤ等の試作・最終製品までありとあらゆる分野で展開されている。その印刷する材料も鉄・銅・ガラス・セラミック・チタン合金・アルミ・ステンレス・砂糖・プラスチックなど多種多様である。また、実験室のレベルでは、電子部品（バラクタ）・多種細胞・インコネル・Wi-Fi デバイスの製造も可能となっている。さらに、いわゆる 4D プリンタのように時間経過や加水等によって変質する素材技術も出てきている。特に注目すべきは、その可能な材料の範囲と強度や変性について、日々拡大を続ける一方で、印刷時間とコストも短縮を続けていることである。

このように多種多様な拡大と深化を続ける 3D プリンタだが、「NextTec」責任者であり、近年の技術革新と軍事の在り方を専門とする、シンガー（Peter Singer）によれば、3D プリンタが全ての産業の中でも、もっとも大きな影響を与えるのは軍事関連の産業であるという。

こうした観点は実務レベルでも共有されており、当時のネラー（Robert Neller）海兵隊司令官は「3D プリンタの軍事転用はまさしく兵站に関するすべての常識を崩壊させるが、私はどちらもクールなことだと思っている」と発言している。米四軍の中でもっとも消極的とされる海兵隊がこのような認識を示しているのは注目に値する。

このような認識は日本を除く、米国、中国、ロシアのような大国、英国、台湾、韓国、ポーランド、イスラエルのようなミドルパワー国家等では共有されており、軍事転用が積極的に実施されている。

2. AM 技術のマルチユース

AM 技術は極めてマルチユースの性格が強い科学技術である。その用途は、航空宇宙産業はもちろん、医療技術そして軍事技術と多種多様な産業領域で革新を生み出している。例えば、ドイツのシーメンス社は AM 技術を用いてガスタービンの製造に着手しており、極めて複雑な構造を短時間で効率的に製造することで、特殊な技術ニーズにあったソリューションを提供している¹⁵⁶。さらに、持続可能性の観点からもこの AM 技術が注目されている。例えば、温度管理のた

¹⁵⁶ Siemens, “Additive Manufacturing: Siemens uses innovative technology to produce gas turbines.

<https://press.siemens.com/global/en/feature/additive-manufacturing-siemens-uses-innovative-technology-produce-gas-turbines>”

めのパーツの製造に AM 技術が利用されているほか、素材やパーツの数量を減らすことにも貢献している¹⁵⁷。

米国や中国では方向性が異なるものの、AM 技術の軍事転用が盛んに行われている。例えば、3D プリンタは、兵站、兵器、作戦と戦場のすべてにおいて大きな変化をもたらす可能性を秘めている。なぜなら リソースに接続できるコンピューターは、そのすべてが生産プラントになりうるからだ。加えて、3D プリンタは、社会がリアルタイムで「社会的製造」することができる「産業及び設備の革命」であり、必要に応じて軍事製造にも利用できる能力がある。

米陸軍は、陸軍、NASA、アラバマ大学との共同プロジェクトとして、ミサイル等を 3D プリンタで製造する研究チームを創設し、既に 2013 年夏、ロケットエンジン噴射器の製造に成功した。しかも、従来工法よりもはるかに短期間・低予算かつ同性能で作成できたという。従来の製品が、6 カ月をかけて、4 つの部品を作り、5 つの溶接と精密な機械加工を行い、それぞれ 1 万ドルかかったのに対し、3D プリンタではわずか 3 週間、それも 5000 ドルの製造費用だけで済んだとされる。他方、装備品の最終製品製造に生かす動きもみられる。2017 年 7 月には、オークリッジ国立研究所と米海軍の技術研究機関 NDTL が共同で、世界初の 3D プリント潜水艇を作成した。作成したのは特殊部隊の隠密裏の展開に使用する SEAL 小型潜水艇 (SDV) である。これまでの SDV のコストは最大 80 万ドルと 3~5 カ月かかっていたが、新設計にもかかわらず僅か 6 万ドルと設計から生産まで数週間で作成できたとしており、米海軍によれば 2019 年にプロトタイプが実運用を開始するという。2020 年には、MH-60S シーホーク 200 機以上を対象とする追加装備であるアンテナマウント—電子戦対策用の機器を格納する—の開発を行い生産した。これは従来の金型を作り直しながら開発し生産するよりも、遥かに時間的にも費用的にも低コストで済んだと評価されている。部品ではあるが、新規開発から量産までを 3D プリンタで済ませようとしている。

¹⁵⁷ Maw, Isaac, "How additive manufacturing drives sustainable manufacturing." *Engineering.com*.

August 21st 2019. <https://www.engineering.com/story/how-additive-manufacturing-drives-sustainable-manufacturing>



(図 4-2 米エネルギー省：3D プリントされた SDV)

中国の 3D プリンタの軍事転用は、研究開発における試作品の作成はもちろんのこと、実任務や最新装備の量産にも活かされており、通常の装備品の一つとして使われている。実際、『解放軍報』の報道によれば、中国軍は 3D プリンタ技術の適用を承認し、軍の装備品の維持・整備・生産で促進する計画を立てている他、ほとんどの金属部品を製造可能な特殊な 3D プリンタの開発研究も成功・実施しているという。特に、航空機部門での活用は著しく、中国軍の空母艦載機である J-15 戦闘機はそのプロトタイプの開発時の試作・製品の生産時に際して、着陸装置を含むチタン合金製重要部品の試作・製造に使用した他、訓練飛行で損耗した小部品交換用に 3D プリンタが使用されているという。着陸装置は要するに航空機の車輪であり、もっとも荷重がかかる大事な機構であることから、中国軍の 3D プリンタに対する評価が伺える。さらに、Y-20 戦略輸送機、J-16 戦闘爆撃機、J-20 ステルス戦闘機、J-31 ステルス戦闘機の生産に際しても、3D プリンタ製のチタン合金製部品が組み込まれているとの情報もある。

3. AM 技術と経済安全保障

上記のように、軍事転用が極めて容易で安価にできてしまう 3D プリンタ等の AM 技術はその技術的特性からも経済安全保障上のリスクが極めて高いといえる。例えば、機器や部品を貿易を通じて輸入することなく、3D プリンタで製造できてしまうと、経済制裁がそもそも効力を発揮しなくなる¹⁵⁸。これは、例えば軍事用途の武器に関してもそうであるし、例えばエネルギー

¹⁵⁸ Johnston, Smith, Troy D., and Irwin, J. Luke, *Additive manufacturing in 2040: Powerful enabler, disruptive threat*. RAND Corporation.

ギー分野では発電所のガスタービン等重要社会インフラの部品の製造においても当てはまる。こうしたことから、AM 技術の経済安全保障上の重要性は極めて高いものだろう。

さらに、3D プリンタは既存のグローバルサプライチェーンにも多大な影響を与えることが指摘されている¹⁵⁹。3D プリンタ技術は製品のサプライチェーンの上流から下流に至る様々な製造工程において技術革新をもたらすものであり、製造コストを大幅に低減させるのみならず、既存のサプライチェーンにおける工程を低減させ、他国の製品や技術に頼ることなく複雑な機器を製造することを可能にする。例えば、米国 GE の航空部門である GE Aviation は、通常であれば 850 ものパーツが必要なターボプロエンジンを 3D プリンタではわずか 12 パーツで製造できることを明らかにした。こうした 3D プリンタの技術革新により輸入品の品目はここ数年でも激減することが予想されており、世界のグローバルサプライチェーンにおけるゲームチェンジャーになり得ることが指摘されている¹⁶⁰。このように、3D プリンタに代表される AM 技術は、軍事転用の危険性はもちろんのことサプライチェーンの構造を大きく変革させる潜在性を有する技術であり、経済安全保障上の影響も極めて高いことがわかる。

4. AM 技術と関連先端科学技術とのシナジー

AM 技術のもう一つの重要な特徴は、他の先端科学技術との強い関係性である。特に先端コンピューティング技術や AI 技術、マシンラーニング技術の技術革新が進んだことで、アディティブ・マニュファクチャリングの能力も格段に進歩してきた。アスタミューゼ社の調査によると、研究者数で見た場合、日本は先端製造技術 (Advanced Manufacturing) と先端工業素材 (Advanced Engineering Materials) で世界 4 位であった。一方で、AI 技術等との複合分野での研究者の数はまだ少ないことが推察される。

AI と AM 技術

AI 技術の発展はアディティブ・マニュファクチャリング技術にも革新的な進歩を齎してきた。例えば、昨年にはカリフォルニア工科大学 (Cal Tech) の研究者らは AI を用いて 3D プリンターの加工をリアルタイムで修正できる仕組みを発明している。AI 技術と AM 技術の複合的な技術革新

¹⁵⁹ Kite-Powell, Jennifer, "Can 3D printing solve Supply chain issues In 2022?" *Forbes* December 29th 2021. <https://www.forbes.com/sites/jenniferhicks/2021/12/29/can-3d-printing-solve-supply-chain-issues-in-2022/?sh=f3bfe8520957>

¹⁶⁰ Supply chain consulting group, "How 3D printing is changing supply chains." <https://www.sccgltd.com/featured-articles/how-3d-printing-is-changing-supply-chains/>

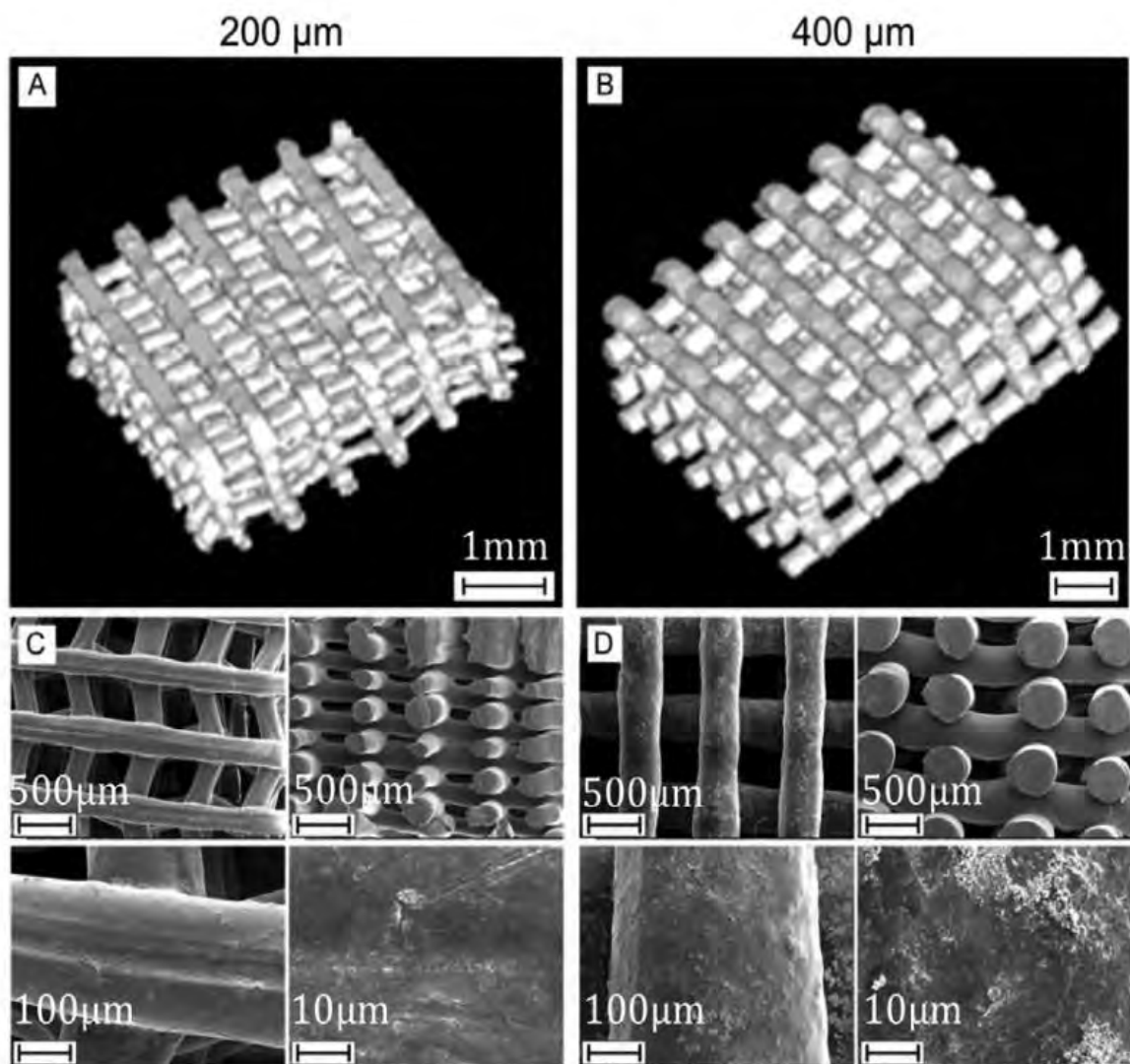
により例えば、歯の治療技術において個々人にあった治療プランを提供できるようになったほか、航空宇宙分野では飛行機のパーツ製造等にこうしたAI と AM の複合技術が用いられている。

先端工業素材と AM 技術：メタマテリアル

メタマテリアルは近年科学者の中でも注目を集める新素材として知られている。メタマテリアルは、電磁気学と光学が絡む非常に複雑な素材概念であるが、端的に言えば、素材そのものの性質を人工的に変化させた物質ということができる。2000 年代のこの新素材の発明により、センシング技術や 3D プリンティング分野では飛躍的な発展が進んでいる。例えば昨年 2021 年 9 月にはマサチューセッツ工科大学の研究チームがメカニカル・メタマテリアルとセンシングを融合した 3D プリント技術を開発し話題を呼んだ。国内では 2009 年に日本電気（株）（NEC）がメタマテリアルを利用した電子基板の開発に成功する等、比較的早い段階からメタマテリアルの産業利用の議論がされてきた。

ナノマニュファクチャリング技術(Nanomanufacturing)

ナノマニュファクチャリング技術は、1 nm から 100 nm 規模のナノサイズの素材や構造、機器等を利用した製造技術である。ナノマニュファクチャリングには、ナノスケールの素材を利用するものはもちろん、ナノレベルでの加工を可能にする技術が使われることから、先端素材科学はもちろん、バイオ技術等との親和性も極めて高い分野である(図 4-3)。例えば、近年では、3D リトグラフ(Lithography)という新たな概念が登場し、高度な 3D ナノ構造のプリンティングが可能になりつつある(図 4-4)。ナノプリンティング技術の革新によって、微小で複雑な立体構造物の加工がより効率的に行えるようになったこともこの技術の特徴である。このようなナノレベルの加工技術は AM 技術の応用範囲を従来の製造業から医療やバイオ技術等まで広げることに大きく貢献してきた。



(図 4-3 ナノプリンティング技術によって製造されたナノバイオ素材)