

(2) 技術コヒーレンス (Coherence)

エクサスケール・コンピューターの技術コヒーレンスは、主に国防省と国立科学財団がリーダーシップを発揮し、NASA、国立衛生研究所 (NIH) そして海洋大気庁 (NOAA) が技術展開を担う (図 1-8)。

Agency	Examples of efforts
Lead: Department of Defense	Funded 18 research, development, test, and evaluation projects, which provided competitively selected projects with high amounts of high-performance computing resources, such as increased hours, that would otherwise not be available to meet mission needs as demand for high-performance computing exceeds resources
Lead: National Science Foundation	Invested in software and data analytics systems at the academic campus, regional, and national levels which led to the deployment of the Frontera high-performance computer at the University of Texas at Austin's Texas Advanced Computing Center in October 2019
Deployment: National Aeronautics and Space Administration	Engineered a cloud computing solution for its user community that lowers the barriers to large scale computing and storage and enhances capabilities in Earth science, including weather and climate prediction
Deployment: National Institutes of Health	Issued funding opportunity announcements for grants and small business awards—including 418 grants, or supplements to grants, to support sustainable and scalable biomedical research software tools resulting in seven patents and more than 3,400 publications
Deployment: National Oceanic and Atmospheric Administration	Increased the availability of datasets to the public by moving over 130 datasets, such as historical weather and lightning observation data, to industry partners' cloud-based systems

(図 1-8 技術コヒーレンスを担保するための各政府機関役割²⁵⁾)

(3) 次世代コンピューティング技術の開発

現行の半導体技術の発展が限界を迎え、新たな大規模技術が台頭する、来るべき次世代の HPC 技術開発のために、国防省、エネルギー省そして国立科学財団がここでも主導的な役割を担う。その上で、例えば、R&D を担う IARPA (Intelligence Advanced Research Projects Activity) や NIST 更には、技術展開を担う NASA は量子技術といったポスト半導体技術の技術開発を推進している (図 1-9)。

Agency	Examples of efforts
Lead: Department of Energy (DOE)	NSF and DOE signed a memorandum of understanding in 2019 to coordinate NSF's Quantum Leap Challenge Institutes and the DOE's National Quantum Information Science Research Centers in support of the National Quantum Initiative Act
Lead: National Science Foundation (NSF)	Supported a program that applies machine learning and artificial intelligence to better understand the impacts of urbanization, natural disasters, and climate change on natural ecosystems and city infrastructure
Foundational R&D agencies: Intelligence Advanced Research Projects Activity	Conducted research across three programs, one of which explored ways to reduce the physical footprint, power, and cost required for conventional computing storage technologies
Foundational R&D agencies: National Institute of Standards and Technology	Established a consortium of federal, academic, and industry partners to enable and grow a robust commercial quantum-based industry and associated supply chain in the United States
Deployment agencies: National Aeronautics and Space Administration	Used quantum computing and other technologies with the potential to improve astronauts' ability to perform activities on the International Space Station and to support communication with unmanned aircraft systems

(図 1-9 次世代コンピューティング技術における各政府機関の活動例²⁶⁾)

²⁵ GAO., *High-Performing Computing*, p. 16

²⁶ *ibid.*, p. 17

(4) 半永久的な HPC エコシステムの構築

ここでもエネルギー省、国防省そして国立科学財団が連携して研究を主導する。その上で3つの技術展開を担う政府機関である NASA, NIH そして NOAA が HPC のエコシステムのキャパシティビルディングを実行する(図 1-10)。こうした機関は、R&D 分野におけるソフトウェア開発の加速やデータやそのデータツールの普及等に努めている。

Agency	Examples of efforts
Lead: Department of Defense (DOD)	Funded the development, use, and maintenance of software to support its mission needs, which had impact on 100 air, land, and sea weapon system classes
Lead: Department of Energy (DOE)	Supported 34 projects to develop a new high-performance computing software ecosystem under its Exascale Computing Project, some of which is also used by the NSF-supported Texas Advanced Computer Center
Lead: National Science Foundation (NSF)	Launched a training program in fiscal year 2017 to prepare and grow the workforce for careers in cyberinfrastructure and, by fiscal year 2020, made 75 awards in addition to providing support for early career faculty and undergraduate researchers
Deployment: National Aeronautics and Space Administration (NASA)	Collaborated with other agencies, such as DOE, NSF, and NOAA, on software ecosystem development to identify solutions that allow earth scientists to analyze and visualize large datasets associated with climate model outputs
Deployment: National Institutes of Health (NIH)	Made publicly available the data, computational models, and software developed in partnership between NIH's National Cancer Institute and DOE, which led to the development of an open-source software platform that provides deep learning methodologies to accelerate cancer research, among other things
Deployment: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)	Identified short and long-term needs to meet high-performance computing requirements and provided the high-performance computing infrastructure to meet its mission goals

(図 1-10 ハイパフォーマンス・コンピューティングのエコシステムを確立するための各政府機関の活動例²⁷⁾)

(5) 官民連携の強化

最後に官民連携の強化が戦略目標として掲げられている。ここではエクサスケール・コンピューティングの研究開発に携わる全ての機関の参画が規定されており、関係省庁や研究所間の相互連携や情報の共有等が促進される(図 1-11)。

Lead Agency	Example of efforts
Department of Defense	Created a suite of software tools for teaching the concepts of design and computational aerodynamic analysis, which over 120 companies and 20 academic institutions used as of 2021
Department of Energy	Partnered with National Institutes of Health's National Cancer Institute on a program to use high-performance computing and artificial intelligence to accelerate specific areas of cancer research, and participated in a public-private partnership that uses computational approaches to reduce the time needed to discover and develop new cancer medicines
National Science Foundation	Awarded graduate research students with internships to acquire the professional competencies and skills needed for careers in science, technology, engineering and mathematics

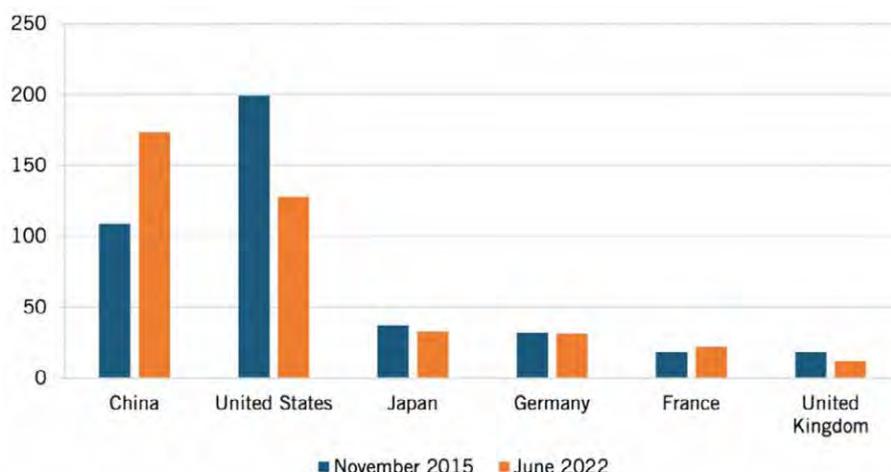
(図 1-11 官民連携における関係省庁の役割²⁸⁾)

²⁷ GAO., *High-Performing Computing*, p. 18

²⁸ 同上。

4. 中国におけるエクサスケール・コンピューティング技術とその開発動向

中国の先進コンピューティング技術はここ 10 年程で目覚ましい発展を遂げた。世界トップ 500 にランクインするスーパーコンピュータの数を見ると、中国のみこの 7 年でその数が飛躍的に増加している(図 1-12)。近年では「天河二号」(Tianhe-2)は 2013 年にスーパーコンピュータトップ 500 で 1 位を獲得する等、革新的な技術発展を見せている²⁹。中国では市場経済移行を目指した 1980 年代の改革開放政策の一環として 1986 年に「国家高技術研究発展計画」(通称「863 計画」)が策定され、2000 年代に入ると HPC もこの枠組みの中で技術開発のロードマップが明確に提示されるようになった。2002 年から 2005 年の間に「ハイパフォーマンス・コンピューティングとコアソフトウェア」というプロジェクトが始動し、HPC 発展のための技術・社会環境を担保する中国のグリッド CNGrid (China National Grid) を進める等 HPC の開発環境への政府が大きく舵を切るようになった³⁰。2006 年から 2010 年には、「高性能コンピューターとグリッドサービス環境」というプログラムが新たに掲げられ、こうした枠組みの中で 2011 年には「天河一号」(Tianhe-1A)が中国で初めてスパコン世界トップ 500 で 1 位の座を獲得することとなる。着実な技術力の進歩を背景に 2011 年から 2017 年には 3 番目のプロジェクトとなる「高性能コンピューターとアプリケーションサービス環境」が開始され、その枠組みで「天河二号」(Tianhe-2)といたさらなる高性能なスパコンが開発されることとなった³¹。



(図 1-12 国別世界トップ 500 のスパコン数³²)

²⁹ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2016. *Future Directions for NSF Advanced Computing Infrastructure to Support U.S. Science and Engineering in 2017-2020*. (Washington, DC: The National Academies Press).

³⁰ Depei, Qian. "CNGrid: A test-bed for grid technologies in China." *Proceedings. 10th IEEE International Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems, 2004*. (IEEE, 2004).

³¹ Qian, Depei, et al., "High performance computing development in china."

³² Nossokoff, Mark, Sorensen, Bob and Joseph, Earl, *To out-compute is to out-compete: Competitive threats and opportunities relative to U.S. government HPC leadership*. (Hyperion Research, 2022), p.

こうした中で、エクサスケール・コンピューティングやそのアプリケーションにさらに特化した開発も進められてきた。2015 年には「ハイパフォーマンス・コンピューティング」という新たなプロジェクトが採択され、2016 年から 5 年計画で研究開発が始動した。具体的には 3 つのメーカーが主導するプロトコールが始動し、それぞれの強みを生かしてエクサスケール・コンピューティングの開発に着手してきた。以下でその 3 つのスパコンメーカーと研究機関によるエクサスケール・コンピューターのプロトコール製造における活動をまとめている。

表 中国のスパコンメーカー及び研究機関の活動³⁴

<p>曙光(Sugon)</p> 	<p>曙光は 1996 年に中国で設立されたスパコンメーカーである。同社は特に、液浸冷却という技術を用いたエクサスケール・コンピューターのエネルギー効率に研究開発の力点を置いており、低温でも蒸発する冷却剤の原理を利用して従来のポンプを用いないより省エネな冷却を実現する。</p>
<p>中国人民解放軍国防科学技術大学 (NUDT) 「天河」チーム</p> 	<p>中国のスパコン「天河」(1号・2号)を開発した人民解放軍直轄の研究大学も今回のプロジェクトに参画している。天河2号でも使用 Matrix 2000 と類似したプロセッサを用いて試作品を作成。現在はエクサスケール・コンピューター向けのより高度な次世代プロセッサの開発にも着手。またインターコネクトサブシステムにおける膨大なエネルギー消費量も課題となっており、光電子コミュニケーションを利用した消費電力の削減にも尽力してきた。</p>
<p>国家並列計算機工学技術研究センター「神威」(Sunway)チーム</p> 	<p>2017 年まで世界最速を誇っていたスパコン「神威・太湖之光」(Sunway TaihuLight)を開発した国家並列計算機工学技術研究センターのチーム。高い性能とエネルギー要件を満たすために、「神威・太湖之光」で使用した SW26010 プロセッサをのエネルギー効率をさらに改善するとともに、エクサスケール・コンピューター仕様の次世代プロセッサの開発にも着手。特に工学技術領域での技術を一新させ、より効率的な冷却システムや高密度のアセンブリーそしてより効率の高いエネルギー共有システム等を今回のプロトコールで実現させた。</p>

このように、今年の中国における先進コンピューター開発は目覚ましい発展を遂げてきた。特に「天河2号」や「神威・太湖之光」は5年もの期間に渡り世界スパコントップ500で一位を

³⁴ Qian, Depei, et al., "High performance computing development in china." を元に執筆者作成。

維持してきた実績を誇り、その技術力の高さを世界に示した³⁵。同時に「CNGrid」に代表されるように、中国独自のグリッド環境の構築にも努めており、米国や欧州のグリッドが科学研究そのものに力点を置いているのに対して、中国のグリッドは、技術ドメインへのアプリケーションと HPC エコロジー環境に焦点が当てられている³⁶。

ここ 10 年で飛躍的な技術革新を実現した中国の先進コンピューティングであるが、幾つか課題も指摘されている。スパコンの世界ランキングでは世界首位を獲得するに至ったものの、その技術アプリケーションにおいては他国より秀でていたとは言えない。こうした問題は政府側の研究開発体制にも起因する。米国のスパコン研究がエネルギー省や国防省といった具体的な政策ニーズに取り組む行政機関が主導してきたのに対して、中国のそれは主に科学技術部や地方政府そして各スパコン製造メーカーに任されることが多かった。さらに、中国国内でのソフトウェア開発での弱さも指摘されている。図 11 が示す通り、最新の HPC のソフトウェアの多くは中国以外の技術先進諸国で開発されたものが多く、現状中国こうした諸外国の仕様に依拠した技術開発を余儀なくされている。素材科学やライフサイエンス、大気科学といった新興科学技術分野のドメインでも中国で実装されているソフトウェアは海外のオープンソースのものや商業用のソフトウェアを使用しているのが現状である。さらに、国内技術人材の海外流出等も懸念されており³⁷、国内でのエクサスケール・コンピューティング技術の内製化にはまだまだ課題も多い。

³⁵ Chi, Xuebin, “The ecology of high-performance computing.” In *China’s e-Science Blue Book 2020* (Springer, 2021).

³⁶ i b i d.

³⁷ 张云泉「中国造出顶级超算但软件跟不上发展」『环球时报』（2018 年 7 月 2 日）

Application domain	Name of software	Developed by	Started year
Atmospheric science	WRF	US	1999
Computational chemistry	Gaussian	US	1970
	ADF	Netherlands	1995
	MOLPRO	UK and Germany	1996
Fluid dynamics	Fluent	US	1983
	LS-Dyna	US	1996
Molecular simulation	GROMACS	Sweden	1991
Materials computation	VASP	Austria	2004
Basic mathematics library	Matlab	US	1984
	BLAS	US	1979
	LAPACK	US	1995
	FFTW	US	1997

(図 1-13 最新 HPC のソフトウェア一覧³⁸⁾)

5. 日本の先進コンピューティング技術：その動向と課題

1990 年以降日本ではスパコン開発が一大産業となり、2000 年以降はスーパーコンピューター「京」のように世界トップレベルの計算速度と性能を兼ね備えたスパコンを生み出してきた。最近では、新型のスーパーコンピューター「富岳」が 8 年半ぶりに世界一を奪還し、中国の「神威・太湖之光」や米国の「サミット」を遥かに凌ぐ計算速度を叩き出したことはメディアでも話題を呼んだ(図 12)。こうした技術革新には、NEC や富士通、日立といった日本の民間製造業の貢献が大きく、我が国の先進コンピューティング技術は企業の高い研究力なくして発展することとはなかっただろう。

一方で政府も先進コンピューティング技術の革新に向けた明確なロードマップを掲げ、近年では Society5.0 を見据えた革新的コンピューティング技術の開発を進めている。文部科学省は「Society5.0 を支える革新的コンピューティング技術の創出」という戦略目標を掲げ、高速処理、低消費電力化、低コスト化等による情報システム全体の高効率化に向けて、従来性能を圧

³⁸ Chi, Xuebin, “The ecology of high-performance computing,” p. 227.

倒的に凌駕する革新的コンピューティングの基盤技術の創出を目指している³⁹。こうした戦略目標に基づき、文科省所管の科学技術振興機構(JST)は「情報処理を質的に大転換させる新たなコンピューティング技術の創出」と「アルゴリズム、アーキテクチャ等の技術レイヤーを連携・協調させた高効率コンピューティング技術の研究開発」を推進している⁴⁰。また経済産業省もこうした先進コンピューティングの開発に前向きである。2019年には「次世代コンピューターが実現する革新的ビジネス」と題したシンポジウムを開催し、AI及び量子コンピューターの可能性や金融分野でのその応用可能性等について、官民学それぞれの専門家が意見を交わした⁴¹。

研究者数を世界と比較しても日本は比較的高い位置にあることがわかる。組織毎の研究者数を見ると、1位は米国のカリフォルニア大学、2位が中国の中国科学院となり続いて3位に東京大学がランクインしている⁴²。さらに、先進コンピューティングと他の科学技術分野との複合領域における研究者数を見てみると、日本は先進コンピューティングとAI技術で世界3位となっている。しかし、全体的な研究者数を見れば、米国と中国が圧倒的に多い傾向にあり、特に中国における研究者数の増加は近年極めて顕著である。



(図 1-14 歴代世界一のスパコンとの1秒間の計算回数比較⁴³)

³⁹ 文部科学省「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術の創出」
https://warp.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/11293659/www.mext.go.jp/b_menu/houdou/30/03/attach/1402603.htm

⁴⁰ 科学技術振興機構(CREST),「Society5.0を支える革新的コンピューティング技術」
https://www.jst.go.jp/ki_soken/crest/research_area/ongoing/bunyah30-4.html
https://www.jst.go.jp/ki_soken/crest/research_area/ongoing/bunyah30-4.html

⁴¹ 経済産業省「次世代コンピューターが実現する革新的ビジネス」(2019年7月4日)
<https://www.meti.go.jp/press/2019/07/20190704002/20190704002.html>

⁴² アスタミューゼ社への再委託報告書。

⁴³ 「日本のスパコン『富岳』、8年半ぶり世界一奪還」『日本経済新聞』(2020年6月23日)
<https://www.nikkei.com/article/DGXMZ06065390S0A620C2MM8000/>

HPC のアプリケーションについても比較的的重点的に政策議論が展開されている。文部科学省は「健康長寿社会の実現」、「防災・環境問題」、「エネルギー問題」、「産業競争力の強化」「基礎科学の発展」といった5つの重点分野を策定、各専門の研究機関や大学そして民間企業と協力してスーパーコンピューター「富岳」の社会実装を試みている⁴⁵。ここではスーパーコンピューターの高い計算能力や速度、一般的な科学技術への重要なインプリケーション等が強調されている(図 1-15)。

スーパーコンピューターの開発・利用の意義

◆ 科学技術の3つの方法

理論、実験、そして、シミュレーション

- ・スーパーコンピューターによるシミュレーションは、多くの分野で理論、実験と並ぶ重要な方法
- ・実験が困難な現象の解明や実験に時間がかかりすぎる場合、コンピュータを用いて仮想的に実験
- ・スーパーコンピューターを用いたシミュレーションの規模及び対象分野は、研究開発の進展と共に絶えず拡大

◆ 高性能計算機(スパコン)とシミュレーション

先端科学技術の実験に高度な実験装置が必要であるのと同様、より高精度なシミュレーションにより、世界に先駆けて、結果を出すためには、世界最高性能のスパコンが必要



(図 1-15 文科省資料 スーパーコンピューターの開発・利用の意義⁴⁶)

しかしながら、日本の先進コンピューティング技術開発は、その高い性能と技術力とは裏腹に、そのアプリケーション面で、米国に劣る点が多い。米国の先進コンピューティング技術政策と比較した場合に明らかなのは、文部科学省が所管する5つの重点分野のステークホルダの中に他の関係省庁が含まれていないという点である。米国場合は、国防省やエネルギー省といった政策ニーズにより近い関係省庁が先導を切って、先進コンピューターの技術開発を牽引してきたことはすでに述べた。日本の場合は、官民学の連携は強調される一方で、こうした政策が省庁の縦割り行政の中で完結してしまい、より政策や社会にニーズに沿った形での技術開発をする体制が構築されていない。明確な政策課題な社会・技術ニーズを満たすための先進コン

⁴⁵ 文部科学省「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ (HPCI) について」

https://www.mext.go.jp/a_menu/kai_hatu/jouhou/hpci/1307375.htm

⁴⁶ i b i d.

ピューティング技術の開発というようなムーンショット的な思考で科学技術政策が施行されるのではなく、むしろ高い性能を誇る先進コンピューターをどのような政策・社会ニーズの解決に用いようかという技術ありきの議論が先行してしまっている。こうした問題は中国の技術課題と共通するところもあるが、日本の場合は技術立国として世界の技術開発を牽引してきたが故に、こうしたムーンショット的な思考による技術開発戦略の策定が十分になされてこなかったと言える。今後経済安全保障の確保を主眼に置き、日本の国際競争力を高めるためにも、長期的な政策課題や社会・技術ニーズに沿った科学技術の基礎研究が先進コンピューティング分野でもなされる必要があるだろう。

第2節 次世代工業材料 (Advanced Manufacturing Materials)

今日の先端科学技術の発展と技術革新において素材科学が果たしてきた役割は極めて大きい。例えば、3D プリンターに代表されるアディティブ・マニファクチャリング (Additive Manufacturing: AM) 等の先端科学技術分野でも先端素材が技術革新を左右する重要な要素技術となっており、先端素材における技術革新は多種多様な分野で技術革新をもたらすことが期待されてきた⁴⁷。また先端素材技術はAI やマシーンラーニングさらには量子技術等の関連分野との関連性も極めて強く、素材分野一般はもちろん広く先端科学技術の発展に付与することが多くの研究からも指摘されてきた⁴⁸。

こうした中で、本章では特に先端素材科学の技術革新が目覚ましい分野の一つでもある「先端エンジニアリング素材」に焦点を当てて、マルチユースの観点からこうした素材技術がどのようにして、異なる用途や文脈で開発され実装・応用されてきたのかを分析する。特に**新素材の開発、既存素材における技術革新**について分析したのち、そうした先端科学素材が持つ経済安全保障上のインプリケーションについて、軍事・民生用途の両面から解説する。最後に主要各国の素材戦略について概観するとともに、日本の素材戦略に対してマルチユースの観点から政策提言をする。

1. 新素材開発

これまでにない新たな性質 (Property) を備えた新素材の開発が世界で進められてきた。特に米国の大学や研究機関を中心に研究が進められており、こうした新たな素材は、3D プリンターや半導体、ロボティクス等幅広い分野での技術革新にも貢献してきた。ここでは新素材の中でも特にマルチユースの観点から汎用性が高い新素材開発について解説する。

<ナノスケール3D プリンティング素材>

⁴⁷ Edward Wakefield, Stanford engineers develop new nanoscale 3D printing material. *3D Printing Media Network*, November 28, 2022. <https://www.3dprintingmedia.network/stanford-engineers-develop-new-nanoscale-3d-printing-material/>

⁴⁸ 例えば, Elton, D. C., Z. Boukouvalas, M. D. Fuge, and P. W. Chung, Deep Learning for molecular design—a review of the state of the art. *Molecular Systems Design & Engineering* 4(4): 828-849 (2019) 及び Mazurka, Łukasz, Agnieszka Pocha, Jan Kaczmarczyk, Krzysztof Rataj, Tomasz Danel, and Michał Warchoł. "Mol-CycleGAN: a generative model for molecular optimization." *Journal of Cheminformatics* 12 (1) (2020): 1-18, Thedford, R. Paxton, et al. The Promise of Soft Matter Enabled Quantum Materials. *Advanced Materials* (2022): 2203908. 等の研究を参照。

2022年には、スタンフォード大学の研究チームがナノスケールの構造物を生成できる新たな素材を開発した。このナノスケール素材は3Dプリンターでナノスケールの構造物を作り出すために用いられるもので、様々な用途や目的に応じて極小の立体構造物を作り出すことができる**と期待されている**。この技術は、複数のポリマーで形成されるプリントする媒体に「**メタル・ナノクラスター**」(metal nanoclusters)を組み込むことで実現したものであり、**メタル・ナノクラスターが3Dプリンターのレーザーに触れた際に生じる化学反応を利用している**。これにより**近い将来、人工衛星やドローン、マイクロエレクトロニクス の内部を保護するより軽量なプロテクターの開発が可能となる**⁴⁹。

(1) 可変性ナノ素材

カリフォルニア工科大学、ジョージア工科大学そしてチューリッヒ工科大学の研究チームは、電気化学におけるシリコンとリチウム合金の化学反応を利用して、形状が変化する新たなナノ素材を開発している。形状変化が可能な素材はすでに存在しているが、例えば、水に濡れた時はある形状になり、乾いた時にはその形状が変化するといった具合にある形状から別の形状に変形しその状態を維持することしかできない。一方で今回の新素材は、その「中間状態」(‘in-between states’)を維持することも可能で、より柔軟に形状を変形させることができるようになる⁵⁰。こうした新素材技術は、**エネルギー貯蔵システムにおけるバッテリーの軽量化や安全性の向上、寿命の向上等々への応用が期待されている**。

(2) 高強度軽量素材

米国マサチューセッツ工科大学は、プラスチックほどの軽さで鉄よりも強固な新素材の開発に成功した。特殊な重合技術を用いて作られたこの新素材は、従来の一面性でスパゲティのような螺旋状の形状をした素材とは異なり、**2重合体(two-dimensional Polymer)素材であり、軽量化と強度の両方を兼ね備えている**⁵¹。この素材は**車両の外部パーツや携帯電話、橋やその他の**

⁴⁹ Stanford University, New nanoscale 3D printing material designed by Stanford engineers could offer better structural protection for satellites, drones, and microelectronics. Stanford News, November 17, 2022. <https://news.stanford.edu/press-releases/2022/11/17/new-nanoscale-3d-structural-protection/>

⁵⁰ Caltech. New Metamaterial Morphs into New Shapes, Taking on New Properties. The Caltech Weekly. September 11, 2019.

⁵¹ Anne Trafton, New lightweight material is stronger than steel. MIT News. February 2, 2023. <https://news.mit.edu/2022/polymer-lightweight-material-2d-0202>

構造物の建築素材に用いられることが想定されており、多種多様な産業分野でのマルチユースが期待されている。

2. 先端素材における技術革新—先端セラミック素材

新素材の開発が進む一方で、従来の先端素材における技術革新は飛躍的に進んでいる。ここでは中でも、高温環境に適応できる先端素材を取り上げ、その技術革新について分析する。各産業分野の技術革新が高まるにつれて、その材料となる素材への温度要件も高まっている。例えば、極超音速ミサイルの保護素材やガスタービンの素材等強度とともに極めて高い温度条件を満たすことが求められる素材分野においては、こうしたニーズを満たすために飛躍的な技術革新が進んでいる。

(1) 先端セラミック素材

マイクロ波誘電体素材(Microwave Dielectric Materials)

マイクロ波誘電体素材はセラミック素材であり、誘電体共振器(Dielectric Resonators)、レドーム(Radome)及び電磁シールド(Electromagnetic Shield)等に用いられる素材であり、軍事やエアロスペース分野でも応用がされてきた素材である。マイクロ波誘電体素材はこれまで、その求められる温度環境に応じて、高温同時焼成セラミック(High-Temperature Co-fired Ceramics: HTCC)、低温同時焼成セラミック(Low-Temperature Co-fired Ceramics: LTCC)と開発が進められてきた。ここ20年を概観する限り、高温環境でも高い誘電パフォーマンスを発揮する酸化アルミニウム(Al_2O_3)由来の高温同時焼成セラミックが軍事技術分野のマイクロ波電子通信に用いられてきた⁵²。

近年では、高温同時焼成セラミック(HTCC)と低温同時焼成セラミック(LTCC)の折衷素材とも言える極低温同時焼成セラミック(Ultralow Temperature Ceramics: ULTCC)が注目を浴びている。合わせて、誘電インク(Dielectric Inks)のさらなる開発に期待が高まっている⁵³(図 2-1)。こうした技術が近い将来軍事技術に転用される可能性が高い。事実、イスラエル企業がすでに

⁵² Shen, Liang-Yu, Philip G. Neudeck, David J. Spry, Glenn M. Beheim, and Gary W. Hunter. Electrical performance of a high temperature 32-I/O HTCC alumina package. Additional Papers and Presentations 2016.

⁵³ Sebastian, Mailadil T., Rick Ubiç, and Heli Jantunen, eds. *Microwave materials and applications*. (John Wiley & Sons, 2017).