

極限マテリアルの研究開発と社会実装

東京理科大学 工学部 機械工学科 准教授 | いのうえ りょう 井上 遼

1. 極限マテリアルとは? : 技術革新の「最後の砦」

既存の材料では機能・性能を維持することができない超高压、強腐食、極低温、あるいはそれらが複合的に作用する極限環境下において、安定した物理的・化学的性能を発揮するよう設計された材料が極限マテリアルと呼ばれるようになった。単なる特殊材料の枠を超え、現代の技術革新における最大のボトルネックを解消するキーテクノロジーと位置づけられている。その潜在的な市場規模は、宇宙開発、次世代エネルギー、深海探査などの関連産業を含めると、世界市場の金額ベースで 100 兆円に達すると試算されており、経済的なインパクトは極めて大きい。科学的な観点からも、極限マテリアルに関する学術論文数は過去 20 年で年平均 10% 以上の高い成長率を維持しており、世界中の研究者がしのぎを削っている。NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の調査によれば¹⁾、日本の極限マテリアルにおける市場支配率は約 50% に達しており、日本が世界をリードする数少ない「国際競争力の源泉」と言っても過言ではない。

極限環境の定義は多岐にわたる。例えば、深海探査の文脈では、水深 10,000 m 級（チャレンジャー海淵など）において約 100 MPa という巨大な静水圧が作用する。この超高压下では、耐圧殻の座屈や疲労破壊に至らない極めて高い信頼性が求められる。また、地球深部や惑星内部を模擬する高压物理学の実験においては、数 GPa から数 100 GPa もの圧力が生じる。常圧下では安定な結晶構造を持つ物質であっても、これほどの圧力下では原子間距離が劇的に変化し、相転移を起こして電気伝導性や硬度がドラスティックに変化する。この変化を制御し、新たな物性を引き出すことも極限マテリアル学の醍醐味である。化学的な極限に目を向ければ、化学プラントや廃炉現場における強酸・

強アルカリ環境が挙げられる。ここでは金属材料の選択溶解や、目に見えないミクロな隙間から進行する粒界腐食による材料劣化が不可避であり、これに耐える高度な耐腐食設計が必須である。特に近年、脱炭素の切り札として期待される次世代原子炉（熔融塩炉など）では、700℃ 以上の高温下でフッ化物や塩化物といった極めて攻撃性の高い熔融塩と接触し続ける必要がある。この過酷な化学的エロージョンに耐える新材料の開発は、クリーンエネルギー実現のための最優先課題となっている。

さらに、宇宙開発や超電導技術に不可欠な極低温環境（20 K 以下の液体水素・液体ヘリウム温度域）では、多くの金属や高分子材料で延性脆性遷移が生じる。これは、常温では粘り強く変形する材料が、ある温度を境にガラスのように脆く割れやすくなる現象である。これに熱収縮に伴う寸法変化や内部応力の集中が加わることで、構造体の破壊リスクは飛躍的に高まる。宇宙空間においては、これに超高真空が加わり、材料からのアウトガス（ガス放出）による光学機器の汚染や、液体潤滑剤が消失することによる駆動部の凝着といった特有の課題が、長期間の機能維持を困難にしている。

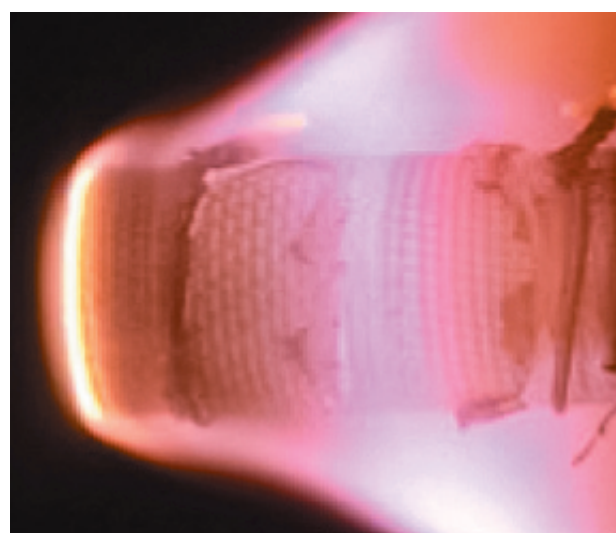
極限マテリアルの開発は、単なるスペックの追求に留まらず、国家の経済安全保障やカーボンニュートラルの実現に直結する。例えば、航空機エンジンの燃焼温度を 100℃ 向上させることができれば、カルノーサイクルに基づく熱効率が劇的に向上し、燃費は数% 改善される。これは地球規模で見れば年間数 100 万トンもの CO₂ 排出削減に直結する数字である。また、エネルギーの地産地消を目指す小型モジュール炉（SMR）や、水素社会のインフラ構築においても、水素脆化（水素が金属内に侵入し脆くなる現象）を克服する新材料は、システムを成立させるための不可欠な 1 ピースとして待ち望まれている。日本がこの分野で高い市場支配率を維持している事実は、素材産業が我が

国の国際競争力における最後の砦であることを示唆しており、研究開発の加速は国家戦略として重みを増している。

2. 極限耐熱材料のニーズ：空力加熱とプラズマの脅威

極超音速輸送、大気圏再突入、核融合、あるいは粒子加速器といった次世代技術の成否を分ける最大の鍵は、材料の耐熱性能にある。著者はこれを極限材料の中でも特に極限耐熱材料と定義し、その開発に注力してきた。マッハ5を超える極超音速飛行においては、機体表面が猛烈な熱に晒される。この空力加熱は、主に2つの物理現象から構成される。一つは、高速で飛行する機体前方の空気が急激に圧縮されることで発生する断熱圧縮である。もう一つは、機体表面近傍の境界層において、空気の粘性によって運動エネルギーが熱エネルギーへと変換される粘性散逸である。これらの相乗効果により、特に機体の先端部（ノーズコーン）や翼のリーディングエッジ（前縁）の表面温度は2,000℃を超える。この温度域では、単に熱に耐えるだけでなく、周囲の高速流体との間で激しい対流熱伝達が起こり、さらに空気中の酸素が解離して反応性の高い原子状酸素となるため、爆発的な高温酸化が進行する。したがって、材料には熱的・力学的・化学的な全ての側面で極限のタフさが要求される。

宇宙機の大気圏再突入環境は、さらに一層過酷である。再突入時には空力加熱によって周囲の気体が電離し、高温のプラズマ状態が形成される。この際の熱流束は数10 MW/m²という、太陽表面の熱負荷をも凌駕する規模に達する。著者らはこの極限環境を地上で再現し、材料の挙動を詳細に観察するため、JAXA/ISAS（宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所）が保有する「アーク加熱風洞装置」を活用し、年数回の共同利用実験を行っている【図1】。この実験では、材料表面で化学反応、溶融、蒸発、さらにはアブレーションと呼ばれる現象が同時に進行する。アブレーションとは、材料の一部が熱分解して炭化し、その際に発生する分解ガスが熱侵入を遮断する、高度な熱防御メカニズムである。【図1】に示す加熱試験中のサンプル

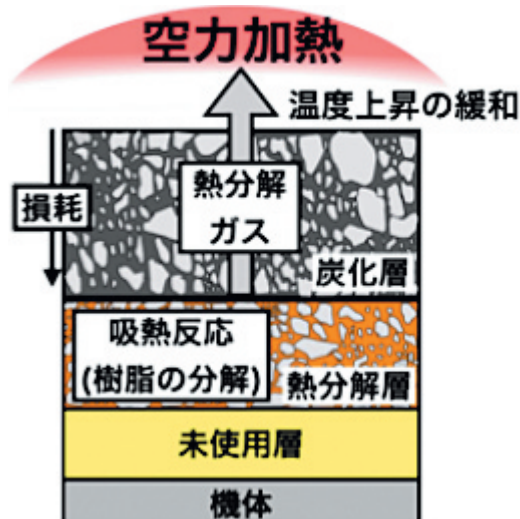


【図1】 JAXA/ISAS のアーク加熱風洞装置を利用した加熱試験中のサンプルの様子

の様子は、まさに材料が身を削りながら内部を保護している過酷な瞬間を捉えたものである。

このような超高温から機体を守るシステムは熱防護システム（TPS：Thermal Protection System）と呼ばれる。TPSには大きく分けて「受動（Passive）型」と「能動（Active）型」の2種類が存在する。受動型TPSは材料自身の高い熱容量や、高い放射率による放射冷却のみによって熱を管理する方法であり、スペースシャトルの耐熱タイル（シリカ断熱材）などがこれに該当する。能動型TPSは、材料が化学変化（熱分解）を起こす際の吸熱反応や、アウトガスの冷却効果を積極的に利用する方法でありアブレーターは能動型TPSに分類される【図2】。

能動型のTPSに利用される主要材料は、炭素繊維とフェノール樹脂などのプラスチックで構成される炭素繊維強化プラスチック（CFRP）である。NASAの高性能アブレーター「PICA（Phenolic Impregnated Carbon Ablator）」は、炭素繊維の不織布を樹脂で結合した極めて軽量かつ断熱性の高いシステムとして有名である。著者らも過去に、高气孔率の多孔質カーボン中に樹脂を含浸させた材料を開発し、TPSへの応用を試みてきた。しかし、アブレーターは一度のミッションで劣化、消耗することが前提の材料である。これは、劣化時に生じる変化を利用した苦肉の策とも言え、将来的な再使用型宇宙往還機などの実現には、材料自身が必要な耐熱温度を持ち、形状を維持できる非消耗型の受動型TPSの実現が強く望まれている。ま



【図2】 Active型のTPSの作動原理の模式図

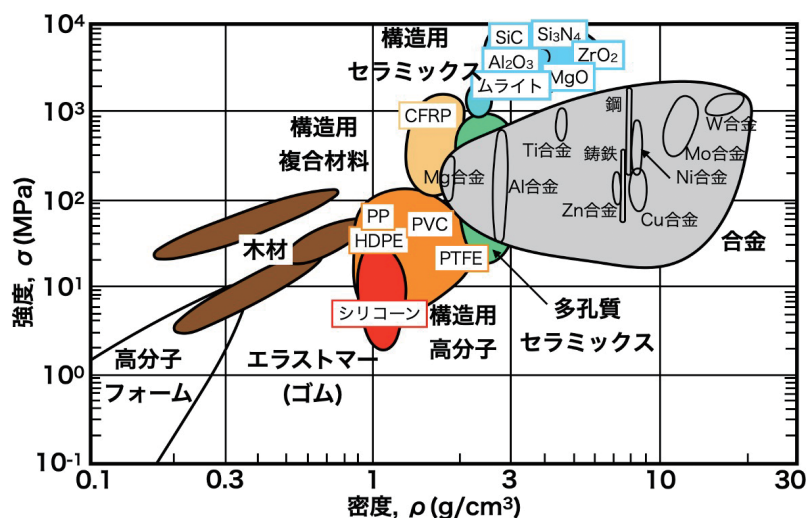
た、次世代の核融合炉発電においても、プラズマを受け止めるダイバータ部材において、 10 MW/m^2 を超える熱流束と高エネルギー粒子照射に耐えうる、非消耗かつ高耐久な耐熱材料へのニーズが爆発的に高まっている。

3. 極限耐熱材料の候補は？：脆性の克服とCMCの台頭

力学的な負荷が常に作用する高温構造部材においては、どれほど融点が高くても、高温下で強度が維持されなければ部品としての機能を果たせない。【図3】は、様々な材料における温度と強度の関係を示したも

のである材料の耐熱限界を具体的に見ると、その厳しさが浮き彫りとなる。高機能プラスチックであるポリイミド（PI）やポリエーテルエーテルケトン（PEEK）といった「スーパーエンブラ」であっても、使用温度は $250\sim 350^\circ\text{C}$ が限界である。これ以上の温度では、急激に分解・炭化が進行する。発電プラント等で用いられる高クロムフェライト鋼（P91等）やオーステナイト系ステンレス鋼（SUS310S等）は、 $600\sim 900^\circ\text{C}$ 付近でクリープ強度や耐酸化性が著しく低下する。Ni基超合金は航空機エンジンのタービンブレード等に広く用いられているが、融点の約8割に相当する $1,100\sim 1,200^\circ\text{C}$ 程度で急激な強度低下が引き起こされる。

一方、共有結合を主体とするセラミックス（炭化物、窒化物、酸化物など）は融点が極めて高く、 $1,500^\circ\text{C}$ を超える高温域でも高い強度を維持できる。特に酸化物セラミックスは、化学的に安定しており、酸素に晒される環境下でも優れた耐酸化性を発揮するため、古くから極限耐熱材料の有力候補として研究されてきた。しかし、セラミックスには本質的に脆い（脆性）という致命的な弱点がある。線形破壊力学の教えによれば、脆性材料の破壊強度は、材料内部に存在する微小な欠陥（き裂）サイズの $1/2$ 乗に反比例して低下する。製造プロセスにおいて、これらミクロン単位の欠陥を完全に排除することは事実上不可能である。1970年代にはNASAや米国DOE（エネルギー省）によって、窒化ケイ素（ Si_3N_4 ）や炭化ケイ素（ SiC ）をエンジン部材として活用する野心的なプロジェクトが



【図3】 様々な温度と各種材料の強度の関係

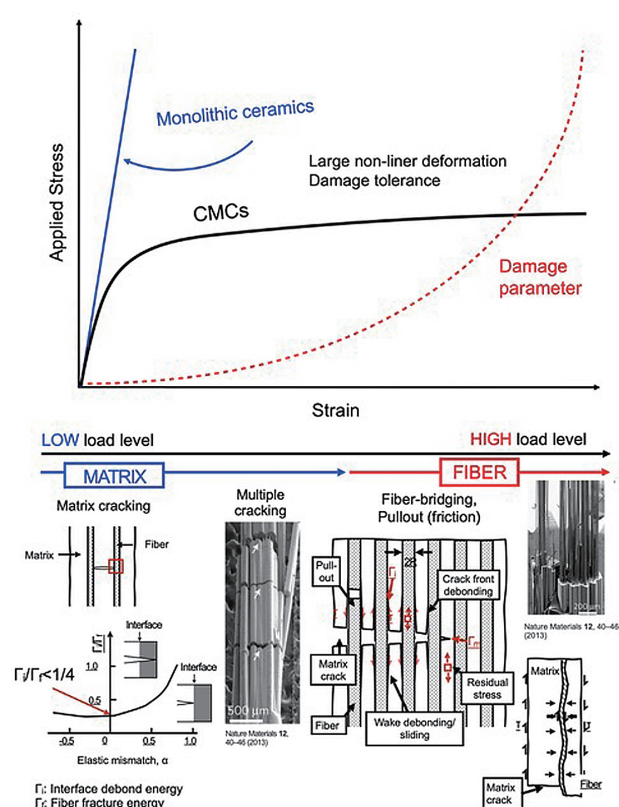
進められたが、最終的には長期信頼性の乏しさと強度のばらつき（ワイブル係数の低さ）をブレークスルーできず、大規模な社会実装には至らなかった。

セラミックス特有の脆性を克服するために開発されたのが、セラミックス繊維とセラミックス母材（マトリックス）を複合化した「セラミックス基複合材料（CMCs：Ceramic Matrix Composites）」である。繊維とマトリックスの間に強すぎず、弱すぎない界面を導入することで、材料に負荷がかかり、マトリックスにき裂が生じて、繊維を貫通せずに界面で偏向させることで繊維の持つ強度を最大限活用できる。そのメカニズムは過去の文献を参照いただきたい^{2), 3)}。現在のCMCの強化材に用いられているSiC、炭素、 Al_2O_3 などをはじめとする連続繊維は数GPaを超える強度を有し、荷重を受け持つことができる。CMCsはセラミックスでありながら、見かけ上の非線形な大きな伸び（ひずみ）と、損傷許容性が実現されている【図4】。

現在、炭化ケイ素繊維を用いた「SiC/SiC 複合材料」は、米GE社などにより航空機エンジンのシュラウド（燃焼室周辺部品）として既に実用化されている。これは「空飛ぶゲームチェンジャー」と呼ばれ、従来のニッケル基合金に比べて重量を1/3に軽量化し、冷却空気量を削減することでエンジンの燃費効率を劇的に向上させている⁴⁾。しかし、このSiC/SiCにも限界はある。タービンプレードのような過酷な高温腐食環境では、表面の保護被膜であるシリカ（ SiO_2 ）が1,400℃付近で水蒸気と反応して揮発し、部材が減肉してしまう。2,000℃以上の環境に対応するためには、Si（ケイ素）を含まない、より融点の高い新たなCMCが必要不可欠となっている。

4. 超高温セラミックスの可能性と次世代熱防御材料

融点が3,000℃を超える遷移金属（ジルコニウム、ハフニウム、タンタル等）のホウ化物、窒化物、炭化物は「超高温セラミックス（UHTCs：Ultra-High Temperature Ceramics）」と呼ばれ、長らく極限耐熱マテリアルの「最終回答」として注目されてきた。ZrB₂、HfB₂、TiB₂、ZrC、HfC、TiC、TaCなどがその代表



【図4】 繊維強化セラミックスの変形挙動と累積損傷蓄積メカニズム

的な材料系である。UHTCsは一般的な工業用セラミックスと同様、粉末を高温・高压で焼き固める焼結プロセスによって製造される。しかし、その極めて高い融点ゆえに、緻密なバルク材を得るには2,000℃を優に超える温度と強大な圧力が必要であり、形状の自由度も極めて低い。また、焼き固めたとしても、脆性というセラミックス本来の弱点は依然として残る。著者らは、この難加工性かつ脆いUHTCsを実用的な構造部材へと昇華させるため、炭素繊維との複合化によって軽量化と損傷許容性を同時に付与する研究を行っている^{5), 6)}。特に注目しているのが、合金を溶融させて炭素繊維基材の中へ含浸させ、炭素やホウ素と反応させてマトリックスをその場（In-situ）で形成させる溶融含浸法（Reactive Melt Infiltration：RMI法）である。この手法を進化させることで、従来のSiC系CMCでは不可能であった、Si（ケイ素）を含まない炭素繊維強化超高温セラミックス基複合材料（C/UHTCMC）の実現に成功した。これは2,000℃を超える極限環境においても、酸化による揮発や溶融を抑え、高い比強度を維持できる。まさに、次世代の極超

音速機や再使用型ロケットの非消耗型受動 TPS としての役割が期待されている材料である。現在、この分野では欧州の C³HARME プロジェクトなどを筆頭に国際競争が激化しており、著者らは東京理科大学ベンチャーである XMat 株式会社を通じ、この先端材料の社会実装を加速させている⁷⁾。

5. 核融合エネルギー分野への展開：人類の夢を支える材料工学

核融合炉の受熱機器（ダイバータ等）の開発は、現在、人類が直面している最も困難な材料工学上の挑戦の一つである。そこでは、10 MW/m² を超える極高熱流束に加え、高エネルギー中性子やヘリウムイオンが絶え間なく照射される過酷な環境に曝される。現在、核融合炉のダイバータ材料として主に検討されているのは、高融点金属であるタングステン（W）やモリブデン（Mo）である。しかし、これらの金属は、再結晶温度（約 1,200℃）を超えると結晶粒が巨大化し、著しく脆くなる（再結晶脆化）。また、中性子照射を受けることで原子が弾き飛ばされ、材料内部にボイドが発生して体積が膨張する「スウェリング」も深刻な問題である。

この難題を解決する「エネルギーのゲームチェンジャー」として期待されているのが、前述の C/UHTCMC である。融点が 3,000℃ を超える UHTCs をマトリックスに用いることで、タングステンが軟化・脆化するような高温域でも、部材としての形状と力学的強度を強固に維持できる。また、プラズマとの相互作用において非常に重要なのが「耐スパッタリング性」である。プラズマ中のイオンが材料表面に衝突した際、材料の原子が弾き出される現象をスパッタリングと呼ぶが、これが激しいと炉内に不純物が混入し、核融合反応が停止（消滅）してしまう。UHTCs はこの原子の結合エネルギーが極めて強いため、タングステンと同等、あるいはそれ以上の耐スパッタリング性を発揮できる可能性がある。

著者らは、三菱ケミカル株式会社および筑波大学プラズマ研究センターとの産学連携のもと、高熱伝導な炭素系複合材料に特殊な合金を溶融含浸し、放射能減衰能を高めたマトリックスの最適化を行っている⁸⁾。

このプロセスにおいて最大の壁となるのは、高温下における溶融合金の「粘度」や「密度」、「表面張力」といった物理特性がほとんど未解明である点である。実験だけで全ての組み合わせを試すのは時間的・コスト的に不可能であるため、第一原理計算や機械学習を駆使した「マテリアルズ・インフォマティクス（MI）」のアプローチが不可欠となっている。材料データから逆算して最適な組成やプロセス条件を導き出す「トップダウン型」の設計手法を確立することが、現在のグローバルな開発競争に勝ち抜くための必須条件である。

また、核融合分野は現在、国家プロジェクトの枠を超え、多くの民間スタートアップが数千億円規模の資金を集めて参入する「民間主導」の局面へと移行している。彼らが求めるのは、数十年先の基礎研究ではなく、数年スパンでプロトタイプ実証を可能にする「製品としての完成度」である。こうしたスピード感に対応できる柔軟な材料設計と供給体制の構築が、今、日本の素材産業に問われている。

6. おわりに：極限を越えて、未来を創る

「材料がもたないから、設計を諦める」。そんな時代は、極限マテリアルの進化によって今まさに終わりを告げようとしている。マッハ 5 で世界の都市を数時間で結ぶ極超音速輸送機、あるいは地上の太陽として無限のエネルギーをもたらす核融合炉。これら SF のようなテクノロジーの成否は、まさに究極の環境に耐えうる一握りの材料が握っていると言っても過言ではない。

著者らが進めている C/UHTCMC をはじめとする新材料の研究開発は、今まさに実験室から実地テスト、そして社会実装への大きな転換点を迎えている。100 兆円とも称される巨大な市場において、日本がこれまで培ってきた「素材を磨き上げる文化」は、世界をリードする最大の武器となるはずである。ベンチャー企業の台頭や、これまでの垣根を超えた産学官連携の取り組みが、その原動力となることを期待している。

しかし、極限の環境に挑む道は常に険しい。今後は、単に優れた特性を持つ材料を「創成」するだけでなく、それが寿命を終えた後にいかにしてリサイクルされ、環境負荷を低減できるかという「循環型社会（サーキュ

ラーエコノミー)」への適合も避けては通れない課題となるだろう。過酷な条件を克服した高度な技術を、いかにして製造コストの低減に繋げ、広く一般社会にまでその恩恵を届けるか。この「社会実装の視点」こそが、技術を真の文化へと昇華させる鍵となる。

極限マテリアルが切り拓く未来において、日本の素材技術が世界の持続可能な発展を支える不可欠な基盤となり、次世代の研究者や技術者が「不可能を可能にする」という夢を持って挑戦できるフィールドであり続けることを、切に願っている。

参考文献

- 1) NEDO, “Innovation Outlook Ver.1.0”, pp. 200 (<https://www.nedo.go.jp/content/800027825.pdf>)
- 2) 理大科学フォーラム：東京理科大学科学教養誌 38(1), 16-18, 2021-02
- 3) 井上遼, 新井優太郎, 垣澤英樹, 下田一哉. (2023). “セラミックス基複合材料及び耐環境コーティングの研究開発動向”, 日本溶射学会誌 溶射, 60(4), 222-228.
- 4) GE Reports (2016 年 12 月 7 日) <https://www.gereports.jp/cfm-leap/>
- 5) Arai, Y., Inoue, R., Goto, K., & Kogo, Y. (2019). “Carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic matrix composites: A review”, *Ceramics International*, 45(12), 14481-14489.
- 6) Inoue, R., Arai, Y., Kubota, Y., Kogo, Y., & Goto, K. (2018). “Oxidation of ZrB₂ and its composites: a review”, *Journal of Materials Science*, 53(21), 14885-14906.
- 7) 株式会社 XMat ホームページ, <https://www.xmat.tech>
- 8) 日本経済新聞, “三菱ケミカル、核融合炉向け材料開発”, https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP705748_Q6A410C2000000/