

補助事業番号 2023M-370

補助事業名 2023年度 計算熱力学を利用したSi系合金含浸による

新規超高温耐熱材料の創成 補助事業

補助事業者名 東京理科大学 先進工学部 向後保雄

## 1 研究の概要

本申請で遂行する研究は「計算熱力学を用いたSi基合金の設計」、「溶融合浸プロセスの確立」及び「作製した次世代耐熱材料の熱的特性の評価・解析」の3項目から構成されている。

(1) 計算熱力学を用いたSi基合金の設計: 計算熱力学ソフトウェア「FactSage」(現有設備)を用いて、「溶融温度が1400–1600°C程度」、「多孔質炭素への含浸後に生成する化合物がSiC及び遷移金属炭化物」及び「生成物及び残留物の融点が2000°C以上」という条件で組成を解析的に設計した。

(2) 溶融合浸プロセスの確立: (1)で設計したSi基合金を毛細管現象により気孔径の異なる多孔質炭素に対して含浸し、気孔径と含浸高さ及び速度の関係を定量的に明らかにする。また、生成したSiCや遷移金属炭化物の組織と合金組成の関係を明らかにし、得られたデータを熱力学計算ソフトのデータベースとしてフィードバックすることで、溶融合浸プロセスに特化した設計指針を提案した。

(3) 次世代耐熱材料の熱的特性の評価・解析: 作製した材料はアーク風洞試験を行うことで、2000°C酸化雰囲気における損耗特性を評価する。実使用環境を模擬した曝露で損耗を評価する。また、耐熱材料の設計指針の一助となる解析手法を確立した。

## 2 研究の目的と背景

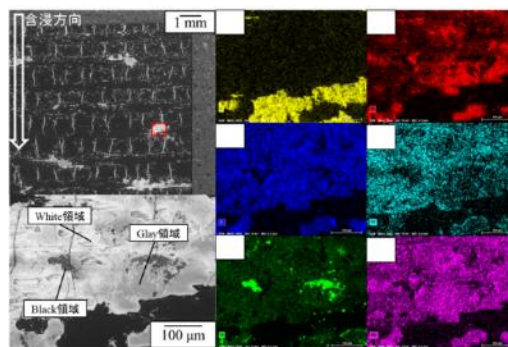
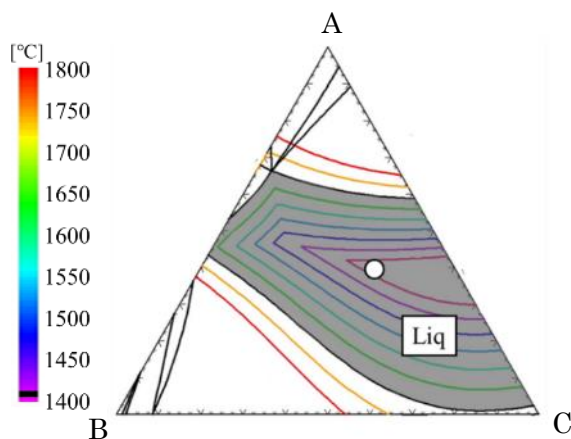
現在の宇宙産業は40–50兆円ほどの市場と言われており、20年以内には100兆円規模の巨大な産業に急成長すると言われており、宇宙への観光では地球に帰還する必要がある。宇宙での研究・開発など成果も必ず地球に持ち帰る必要がある。このため、大気圏再突入は避けられない障壁である。大気圏再突入で機体は空力加熱と呼ばれる急激な断熱圧縮により2000°Cを超える熱にさらされるため、使用できる耐熱材料は非常に限られている。国際的にも新規耐熱材料の創成は滞っており、新規耐熱材料を創製できれば世界に対して我が国の宇宙往還技術の先進性を確保することができ、莫大な規模を有する宇宙産業の根幹を支える技術になると言える。

大気圏再突入機の耐熱材料はアブレータと呼ばれる炭素繊維と樹脂からなる材料が最もよく使われており、これが熱で分解する際に熱エネルギーを吸収することで突入時の熱から守っている。しかし、このメカニズムでは材料自身が損耗しながら熱防御することを意味しており、機体の形状を維持しなくてはならない部材には使用することができない。そこで、本申請では大気圏再突入時に材料が損耗することがない新規耐熱材料を作製・評価することを目的とする。具体的には①Siと遷移金属元素(Zr, Hf, V, Mo等)からなる合金組成を設計、②設計した合金を溶融し、多孔質炭素へ含浸・反応させることでSiC及び融点が3000°Cを超える超高温セラミックスと呼ばれる遷移

金属炭化物からなる材料を作製, ③大気圏再突入を模擬できる2000°C酸化雰囲気でのアーク風洞試験と熱解析による熱的特性の評価及びコンセプトの実証, の3項目から構成される研究である。2年間という短期間で作製と評価の双方を可能にするために, 情報科学と熱力学の融合である計算熱力学を取り入れた革新的な材料創成プロセスを確立し, 大気圏再突入を模擬した評価・解析によりコンセプトが実現可能であることを実証する。

### 3 研究内容

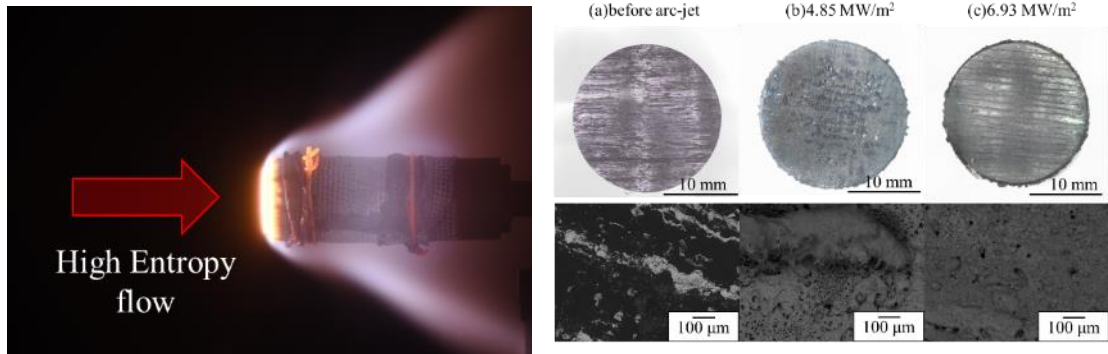
(1), (2) 溶融合浸に用いる合金の組成設計に関する研究及び合金試作及び溶融合浸により作製した材料の評価 (<https://www.kogolab.com/jka2023report>)



計算状態図と液相等温線図による合金設計  
 灰色領域が液相を示している  
 (A, B, Cはそれぞれ元素または特定の合金組成を表している。論文・特許未発表のため材料種は記載していない。)

設計した合金を溶融させ, 基材(多孔質なC/C複合材料)に含浸した際の断面組織と元素マッピング分析結果  
 (論文・特許未発表のため元素種は記載していない。)

(3) 熱的特性評価及び損耗特性評価 (<https://www.kogolab.com/jka2023report>)



マッハ5以上で飛行する極超音速旅客機部材が曝されると予想される2000°C以上の酸化雰囲気かつ動圧が作用する環境を再現可能なアーク風洞試験の様子

アーク風洞試験による約5MW/m<sup>2</sup>及び7MW/m<sup>2</sup>のハイエンタルピー気流で曝露した際の試料表面外観  
最大2400~2600°C程度まで表面温度が上昇したが、従来のC/C部材と比較して5%以上損耗が軽減された

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

2040~2050年を目標に音速の5倍以上で飛行し、巡航中に機体が2000°C以上の酸化雰囲気に曝露される極超音速旅客機の開発が進められていることから、これからもこのような極限環境で使用される材料のニーズは存在し続けるものと予想している。極超音速旅客機の実現は日本から世界中に数時間以内に到達できることを意味しており、真に「小さな世界」を実現できる技術である。従って、このような人や物の革新的な輸送技術の発展に生かされると考えられる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで炭素繊維強化プラスチック(CFRP)や炭素繊維強化炭素(C/C)、セラミックス基複合材料といった宇宙用構造材料や耐熱材料の力学特性評価や力学的信頼性の評価を行ってきた。近年はアブレータと呼ばれる大気圏再突入時に自身の損耗を許容しながら部材を熱から守る材料の創成と評価に力を入れてきた(JKA2020M-193による助成)。この際基材には多孔質な炭素を用いていたが、金属の含浸により多孔質な炭素をセラミックス化することが出来れば、損耗を許容する耐熱材料だけでなく、損耗を抑制する耐熱材料が創成できると思い、本申請に至った。若き共同研究者の尽力もあり計算状態図などの新しい技術を取り入れた設計指針を申請の通り確立することができ、ありとあらゆる航空宇宙用耐熱材料の設計指針を提案することが出来た。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

### 本事業に関する学会発表

- 1) 新井 優太郎, 三溝 朱音, 井上 遼, 西尾 圭史, 向後 保雄, 複雑組成を有する耐熱セラミックス基複合材料の設計指針の提案, 日本セラミックス協会2024年会, 熊本大学黒髪キャンパス, 熊本県熊本市 (2024) (口頭)
- 2) 小宮 優輝, 多田 有沙, 鶴岡 涼, 木暮 早希, 新井 優太郎, 向後 保雄, 耐熱ハイエントロピー合金と C/C を用いた耐熱多元素セラミックス基複合材料を創生する試み, 日本セラミックス協会2024年会, 熊本大学黒髪キャンパス, 熊本県熊本市 (2024) (口頭)
- 3) 多田 有沙, 新井 優太郎, 向後 保雄, 耐熱ハイエントロピー合金含浸法による多元素セラミックス基複合材料の作製と損耗挙動評価, 日本セラミックス協会2024年会, 熊本大学黒髪キャンパス, 熊本県熊本市 (2024) (口頭)  
(国際査読付き雑誌(Journal of Alloys and compounds等)への投稿準備中)

## 7 補助事業に係る成果物

該当なし

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 東京理科大学先進工学部

(トウキョウリカダイガクセンシンコウガクブ)

住 所: 〒125-8585

東京都葛飾区新宿6-3-1

担 当 者: 教授 向後 保雄(コウゴ ヤスオ)

担 当 部 署: マテリアル創成工学科向後・新井研究室

(マテリアルソウセイコウガツカコウゴアライケンキュウシツ)

E - m a i l: kogo@rs.tus.ac.jp

U R L: <https://www.kogolab.com>