

補助事業番号 2024M-400

補助事業名 2024年度 航空宇宙用構造部材としての

全元素ハイエントロピー材料の創成 補助事業

補助事業者名 東京理科大学 新井 優太郎

1 研究の概要

本事業では次世代の耐熱材料として金属元素と非金属元素の双方が複数含まれる全元素ハイエントロピー材料の作製プロセスの確立と損耗挙動評価を目的に研究を実施した。最終的に非金属元素を含む合金材料を多孔質な炭素基材に対して含浸することで耐熱全元素ハイエントロピー材料の作製を達成した。

溶融合浸は多孔質な基材に対して溶融した金属を流し込み、基材との化学反応により耐熱材料を形成するプロセスである。本申請では合金設計は非金属を含まない合金と同様に計算熱力学を援用した組成設計が有効であることを示した。一方で、含浸については非金属を複数種含む基材に合金を含浸することが非常に困難であり、これを合金と基材双方に非金属元素含む材料を用いることで解決した。一方で、複数種の非金属を含む基材への溶融合浸挙動の解明という学術的な課題を見出すことが出来た。

作製した材料の損耗挙動については次世代耐熱材料の代表的な曝露雰囲気とされる2000°C酸化雰囲気を再現するために、JAXA/ISASのアーケ風洞試験装置を使用した曝露試験を実施した。酸化膜を形成して損耗を抑制するという挙動は従来材料と類似していたが、基材と比較して損耗が抑制されており、全元素ハイエントロピー材料が次世代耐熱材料の1つの選択肢であることを示した。

2 研究の目的と背景

5種類以上の金属元素をおよそ等モル量含み単一な固溶体を形成している合金をハイエントロピー合金と呼ぶ。この「ハイエントロピー」という概念は近年セラミックスにも応用され、特に融点が3000°C以上の複数の遷移金属のホウ化物または炭化物は耐熱ハイエントロピーセラミックスと呼ばれている。ハイエントロピーという概念は上述の通りもともと合金で提唱されたものであり、個々の要素にはなかった特異な特性を発現することが知られている。一方で、ハイエントロピーセラミックスでは金属元素が多元素化したものの非金属元素は1種類であり、それは単に遷移金属ホウ化物や炭化物の混合体である場合が多く、真にハイエントロピーの概念をセラミックスに導入するならば、非金属元素も複数存在するべきである。しかしながら、そのような材料は国際的にもほとんど存在せず、その作製プロセスも確立されていなかった。

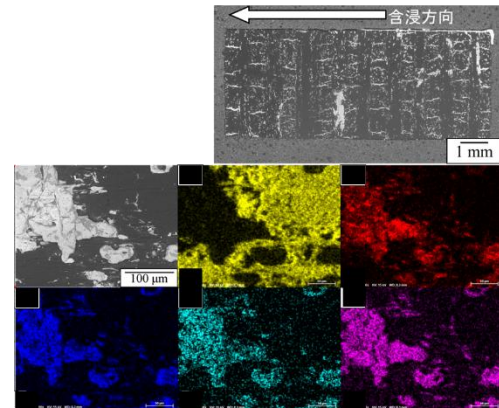
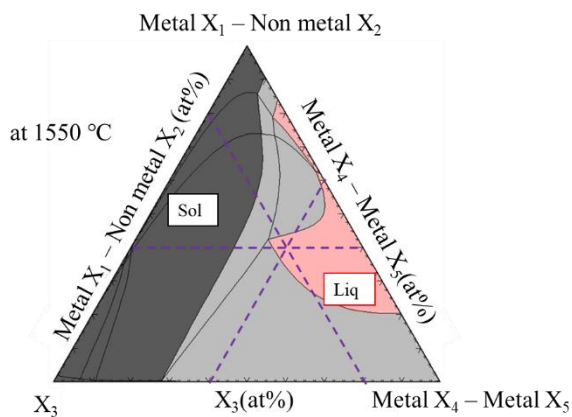
本研究では真にセラミックスにおける「ハイエントロピー」の効果を学術的に検証するために、金属元素と非金属元素の双方を複数種含む全元素ハイエントロピー材料の作製及び評価を目的とし研究を遂行した。

3 研究内容

(1) 金属元素と非金属元素の双方を複数種含む

全元素ハイエントロピー材料の作製プロセスの試行と確立

(<https://www.kogolab.com/jka2024report>)

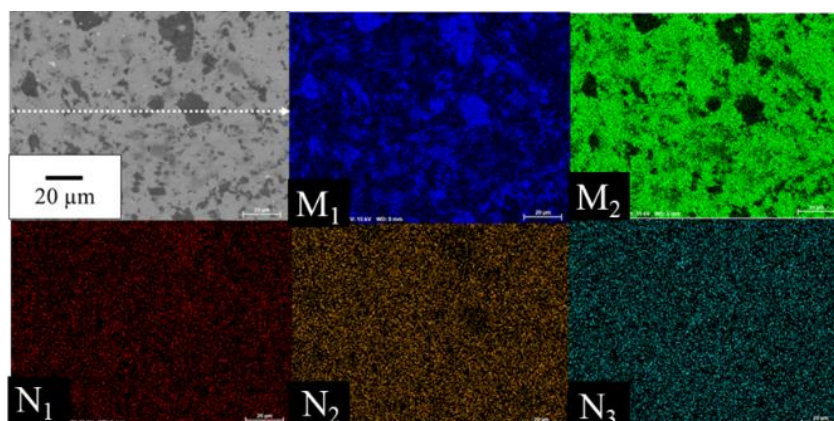


計算熱力学を援用した非金属元素を含む合金の設計した。系は五元系であり擬三成分系で表現している。各元素は論文未発表のため、記載していない。

設計した非金属を含有する合金を多孔質な炭素基材に含浸させることで、全元素ハイエントロピー材料を作製した。各元素は論文未発表のため、記載していない。

(2) 非金属元素を複数種混合する基材の実現可能性の調査

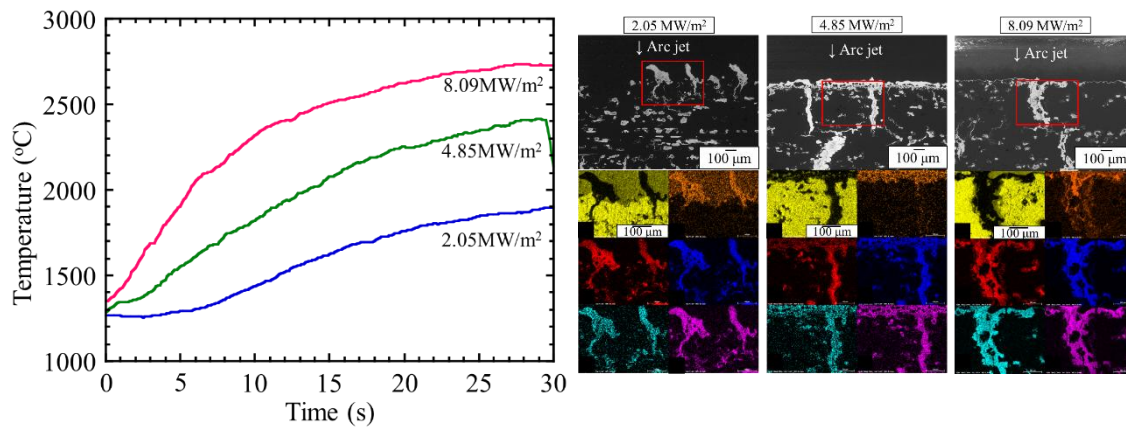
(<https://www.kogolab.com/jka2024report>)



金属元素(M₁, M₂)と非金属元素(N₁, N₂, N₃)を含む多孔質基材の試作結果である。均一な分散を達成したが、基材への合金の含浸は困難であり、気孔率や反応性、濡れ性の定量化を今後実施予定である。

(3) 全元素ハイエントロピー材料の損耗挙動評価

(<https://www.kogolab.com/jka2024report>)



2000°C近傍及び2000°C以上での酸化雰囲気における全元素ハイエントロピー材料の損耗挙動である。表面温度は最大2700°Cまで上昇したが、表面には保護膜が形成され、試験前の厚さに対する試験後の厚さの割合(損耗率)を10%未満に抑制することが出来た。従来の耐熱複合材料と比較して損耗率の低減に成功した。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

2000°C級の耐熱材料は今後30年で開発が進む大気圏内をマッハ5以上で巡航する極超音速旅客機の耐熱部材や大気圏再突入機の熱防御システムとしての応用が期待される。さらに、今後航空宇宙分野だけではなく、核融合炉の耐熱部材として次世代材料の探索が進められることが期待されており、幅広い分野での応用が期待される。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまで超高温セラミックスと呼ばれる融点3000°C以上の遷移金属ホウ化物、炭化物及び窒化物の作製・評価、航空機用ガスタービンエンジン部材であるSiC繊維強化SiCマトリックス複合材料の作製及びSiC/SiC用耐環境コーティングの評価、ハイエントロピー合金及びハイエントロピーセラミックスの作製・評価と耐熱材料の研究に従事してきた。本研究は国際的にも何の疑いもなく使用されている「ハイエントロピー」という概念を疑い、真にハイエントロピーな材料とその恩恵を学術的に明らかにすることを試みた。特性の発現を目的とした場合、本研究のような多元素材料を直接創成する研究は重要である。一方で、さらにハイエントロピーがもたらす特性への恩恵を定量的に明らかにするには、原子同士の相互作用を量子力学的な観点から明らかにする必要があると思いついた。量子力学を援用した材料プロセスの確立を意味しており、研究的にさらに発展的で学際的な課題を思い至る重要な研究課題であった。

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

- Yutaro Arai, Ryo Tsuruoka, Arisa Tada, Ryo Inoue, Yasuo Kogo, A design of UHTCs and refractory compositionally complex ceramics used at above 2000oC by using calculation thermodynamics, 16th Pacific Rim Conference on Ceramic and Glass Technology including Glass & Optical Materials Division Meeting (PacRim16, GOMD 2025) (2025, 招待講演)
- 新井 優太郎; 多田 有沙; 井上 遼; 向後 保雄, 計算熱力学を援用したハイエントロピー合金含浸法による耐熱多元素セラミックス基複合材料の創成と損耗挙動評価, 第16回日本複合材料会議(JCCM16) (2025)
- 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広域温度帯に対応した次世代耐熱材料の創成, M&P2024 機械材料・材料加工技術講演会 (2024) (国際査読付き雑誌(Journal of the European Ceramic Society 等)への投稿準備中)

7 補助事業に係る成果物

該当ありません。

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: 役職名 講師 新井 優太郎(アライ ユウタロウ)

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 : arai.yutaro@rs.tus.ac.jp

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