



Tokyo Tech

Press Release

2024 年 5 月 17 日

東京工業大学

拡散誘起再結晶領域におけるカーケンドール効果の解明

－ 高温での安定性と耐久性に優れた新規金属材料開発に期待 －

【要点】

- 異種金属界面の拡散誘起再結晶領域で生成するボイドの成長機構を解明。
- 実験的な観察と数値解析モデルからカーケンドールボイドの分布と量を定量化。
- カーケンドール効果を利用した多孔質微細組織を持つ材料など、新たな高温金属材料の開発に期待。

【概要】

東京工業大学 物質理工学院 材料系の小林郁夫准教授と Minho Oh（オ・ミンホ）助教らの研究チームは、ニッケル-タングステン界面（Ni/W）に形成される**拡散誘起再結晶（DIR）領域**（用語 1）内での**カーケンドールボイド**（用語 2）を実験的に観察し、成長機構を解明することに成功した。

高温金属材料の開発において、金属間化合物の形成とカーケンドールボイドの生成は、材料の安定性と耐久性に大きな影響を与える大きな問題である。しかしこれまで、カーケンドールボイドの直接的な観察や定量的な分析はほとんど行われてこなかった。

研究チームは今回、Ni/W 拡散界面での相互拡散により形成される金属間化合物層と DIR 領域を観察した。同時に、DIR 領域内の Ni および W の拡散速度差によって生じるカーケンドール効果でボイドが生成される過程を実験的に観察した。さらにカーケンドールボイドの分布と量を実験的観察と数値解析モデルによって同時に定量化し、比較解析した。これらの結果から、 Ni_4W 金属間化合物の形成や DIR 領域の生成、カーケンドールボイドの生成過程を解明することに成功した。

今回の研究では、カーケンドールボイド生成に関する従来のモデルを改善するとともに、相安定性や原子移動の速度について、高温金属材料の開発に役立つ知見を得ることができた。

本研究の成果は、防衛産業用の金属材料などの高温用金属材料の開発に貢献できる。今後は高温での材料の安定性と耐久性の向上や、カーケンドール効果を利用した多孔性微細組織を持つ材料の製造などへの応用が期待される。

本研究成果は、東京工業大学 物質理工学院 材料系の梶原正憲名誉教授、小林郁夫准教授、Minho Oh 助教、Chosun University の Hee-Soo Kim（キム・ヒース）教授によって行われ、「*Journal of Alloys and Compounds*」で 4 月 21 日にオンライン掲載された。

●背景

高温金属材料の開発において、2種類以上の金属によって構成される化合物である金属間化合物の形成とカーケンドールボイドの生成は重要な課題である。ニッケル-タングステン (Ni/W) 界面では、ニッケル (Ni) 原子とタングステン (W) 原子の相互拡散により金属間化合物層が形成され、同時に拡散誘起再結晶 (DIR) 領域が生成する (図 1)。これらの問題は、高温での材料の安定性と耐久性に大きな影響を与える。過去の研究では、異種金属間界面での金属間化合物の形成と DIR 領域の生成に焦点を当ててきたが、拡散元素間の速度差によって生成されるカーケンドールボイドに対する定量的な分析や、熱処理時間による変化に関する研究は非常に限られている。特に、DIR 領域でのカーケンドールボイドの直接的な観察はこれまで行われていなかった。

本研究では、さまざまな実験手法を使用して、Ni-W 拡散界面での金属間化合物層と DIR 領域の形成とともに、DIR 領域でのカーケンドールボイド生成を初めて直接観察した。さらに数値解析モデルを使用して、カーケンドールボイドの定量的な解析を行い、生成メカニズムを解明した。

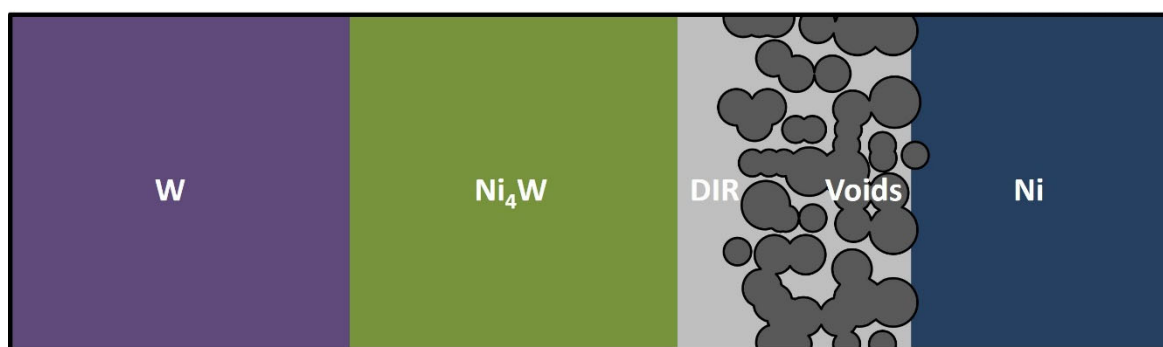
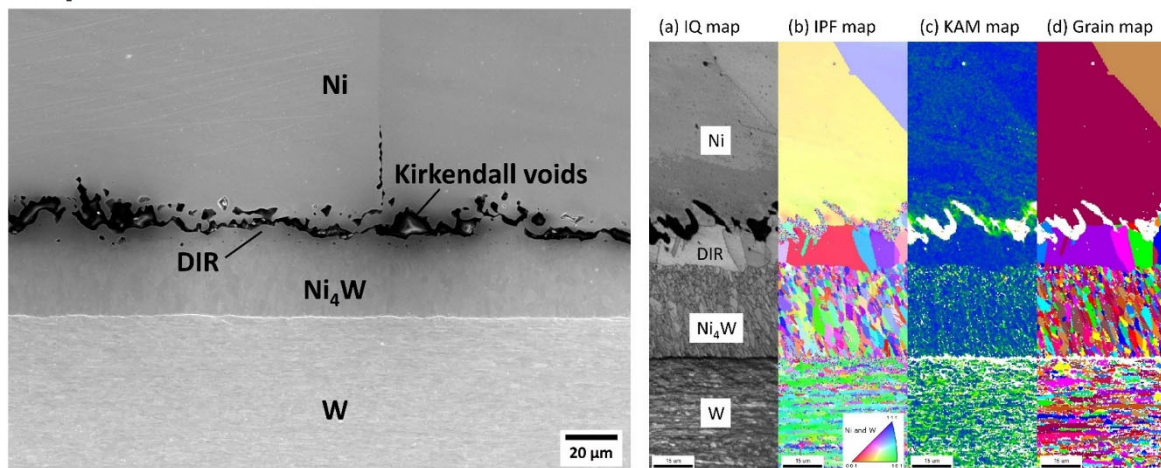


図 1. Ni/W 界面の模式図

●研究成果

本研究ではさまざまな実験技術を用いて、Ni/W 拡散界面での相互拡散により形成される金属間化合物層と DIR 領域を観察した (図 2 上)。同時に、DIR 領域内の Ni および W の拡散速度差によって生じるカーケンドール効果により、ボイドが生成されることを実験的に観察した。さらに、カーケンドールボイドの分布と量を実験的観察と数値解析モデルによって同時に定量化し、比較解析した (図 2 下)。これらの結果から、Ni/W 界面での相互作用に関する洞察を得ることで、 Ni_4W 金属間化合物の形成や DIR 領域の生成、およびカーケンドールボイドの生成過程を理解することができた。 Ni_4W と Ni の間に形成される DIR 領域の生成には、拡散速度が速い粒界拡散の寄与が体積拡散より約 300 倍多いことが本研究から確認され、粒界拡散によってカーケンドールボイドの生成も促進されることが解明された。これにより、拡散界面での完全固溶領域や、金属間化合物内でのカーケンドール効果によるボイド生成に関する従来モデルの課題を改善できた。さらに高温金属材料での応用につながる、相安定性や原子移動の速度についての知見が得られた。

Experimental observations



Numerical calculations with extended model

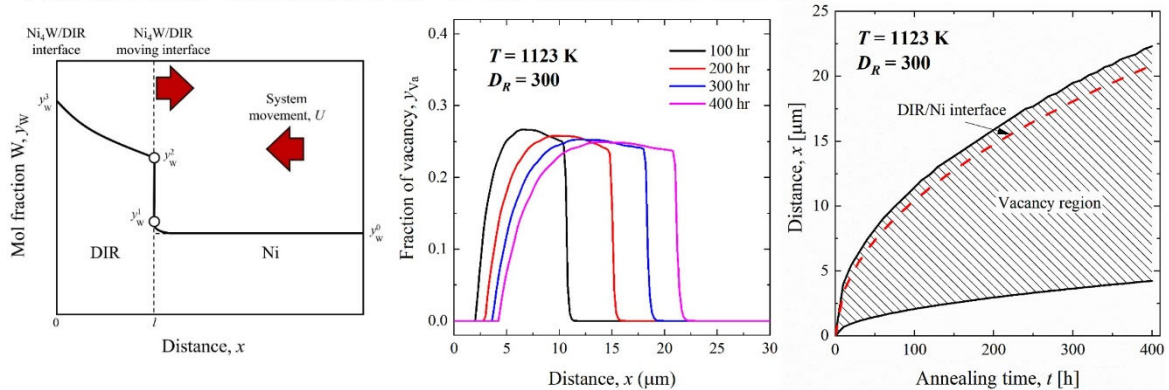


図 2. Ni(W)DIR 領域に生成したカーケンドールボイドに関する実験的観察結果（上）と、数値解析計算による分析結果（下）

●社会的インパクト

本研究の成果は、より安全かつ信頼性の高い高温金属材料やシステムの開発につながるものであり、防衛産業用などの高温用金属材料の開発に貢献することが期待される。金属間化合物層と DIR 領域の形成メカニズムを理解できたことは、高温での材料の安定性と耐久性の向上につながる。また、カーケンドールボイドの生成と関連する新たな洞察は、高温環境で発生する可能性のある材料の損傷の対処や、故障メカニズムの理解に活用することができる。さらにカーケンドール効果を利用した多孔性微細組織を持つ材料の製造にも寄与することが可能である。これらの研究成果は、高温で使用される金属材料の熱処理やプロセス開発、高温環境での構造物や装置の設計に活用されることが期待される。

●今後の展開

この研究の今後、今回の研究で得られた結果をもとに、さらに深い実験や理論研究を行うことができる。たとえば、さまざまな実験条件でのデータ収集と分析によって、結果の一般性を確認し、追加のメカニズムや相互作用を探索することができる。同時に、研究結果を活用して産業現場での応用可能性を探索することも重要である。具体的には、カーケンドール効果を利用した多孔質微細組織を持つ材料の開発技術などを通じて、実際の製

品やプロセスの開発に活用し、新しい材料や技術の開発に貢献できる。さらに、この研究を基にしたより広範な研究プロジェクトを計画し、推進して、関連分野での知識増進とイノベーションをリードすることもできる。

●付記

本研究は、池谷科学技術振興財団の支援を受けて実施した。

【用語説明】

- (1) **拡散誘起再結晶 (DIR) 領域** (Diffusion induced recrystallization) : 物質の拡散によって、結晶の成長や再配列による再結晶が生じる領域。これは金属間化合物ではなく、固溶領域である。
- (2) **カーケンドールボイド** (Kirkendall void) : 界面で固有拡散の不均衡により発生した原子空孔（格子欠陥）が消滅することなく集積したことにより発生するボイド。

【論文情報】

掲載誌 : *Journal of Alloys and Compounds*

論文タイトル : Understanding Kirkendall effect in Ni(W) diffusion-induced recrystallization region

著者 : Minh Oh, Hee-Soo Kim, Equo Kobayashi, Masanori Kajihara

DOI : 10.1016/j.jallcom.2024.174556

【問い合わせ先】

東京工業大学 物質理工学院 材料系 助教

オ ミンホ

Email: o.m.aa@m.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2559

FAX: 03-5734-3017

【取材申し込み先】

東京工業大学 総務部 広報課

Email: media@jim.titech.ac.jp

TEL: 03-5734-2975 FAX: 03-5734-3661