

## 次世代型耐熱材料としての複相金属間化合物の用途展開のための基盤学問体系構築

Basic Research to Develop Dual Multi-phase Intermetallic Alloys as Next-generation Type Heat Resistant Materials

高杉 隆幸 (TAKAYUKI TAKASUGI)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授



### 研究の概要

優れた結晶整合性と微細組織を有する  $L1_2$  相 ( $Ni_3Al$ )- $DO_{22}$  相 ( $Ni_3V$ ) 擬 2 元系複相金属間化合物合金 ( $Ni$  基超々合金), ならびに,  $Ni_3(Si, Ti)$  および  $Ni_3Si$  基複相金属間化合物合金に重点を置いて研究を行う。まず、合金設計、微細組織形成機構、相・組織安定性、高温力学特性とその変形機構解明等についての基盤学問体系の構築、続いて、酸化特性さらには腐食特性等の耐環境特性について、加えて、数種の次世代型耐熱部材・部品の製造を企業との連携により試行し、用途展開のための道を拓くことを目的とする。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：金属間化合物, 耐熱材料, 合金設計, 複相組織

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化を引き起こしている  $CO_2$  削減のためには熱変換システム装置や高温製造装置のエネルギー効率の向上が必要であり、新規な耐熱材料の開発が求められている。研究者等は、最密充填結晶構造 (GCP) に属する  $Ni_3X$  型金属間化合物相同士を複相化することで高温強度と延性を兼備する新規耐熱合金開発のコンセプトを生み出し、高温材料として優れた特性を発現する基本成分と組織を創製した。

### 2. 研究の目的

優れた結晶整合性と微細組織を有する  $L1_2$  相 ( $Ni_3Al$ )- $DO_{22}$  相 ( $Ni_3V$ ) 擬 2 元系複相金属間化合物合金 ( $Ni$  基超々合金), ならびに,  $Ni_3(Si, Ti)$  および  $Ni_3Si$  基複相金属間化合物合金に重点を置いて研究を行う。まず、合金設計、微細組織形成機構、相・組織安定性、高温力学特性とその変形機構解明等の基礎研究、続いて、酸化特性さらには腐食特性等の耐環境特性について、加えて、数種の次世代型耐熱部材・部品の製造を企業との連携により試行し、用途展開のための道を拓くことを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 合金設計と組織創製および組織安定性の解明：各種合金成分における相関係の把握、構成相の同定、固溶限の決定に基づき、状態

図の構築を行い、組織形成の概要を把握し、構成相間の結晶整合性と微細組織を有する合金設計と組織制御を行う。

(2) 高温力学および耐環境特性の解明：各種の高温力学試験を行う。これらの試験を通じて、高温度域で高強度、高延性、高クリープ寿命を兼備する合金を抽出する。続いて、高温大気中での酸化特性ならびに各種溶液中での腐食特性評価とその機構解明を行い、力学特性と耐環境特性とのバランスに富む合金の開発を行う。

(3) 製造・加工技術、用途展開：企業との連携研究により、素材製造法、2 次加工法の確立を行う。汎用製造・加工法により、ジェット・エンジンタービン・ブレード、硬質・高融点金属用摩擦攪拌接合用ツール、高温特殊環境用締結部材、超耐熱特殊環境用軸受部材の開発を行い、次世代型耐熱材料としての道筋をつける。

### 4. これまでの成果

○  $Ni_3Al-Ni_3V$  系複相金属間化合物合金 ( $Ni$  基超々合金) について

1) 2 重複相組織中の界面構造は合金成分に依存して整合あるいは半整合界面であることが把握された。また、チャンネル部の  $Ni_3V$  バリエーション構造は界面エネルギーや弾性的なひずみエネルギーを最小にする配行をとることを明らかにした (図1)。

2) 2 重複相組織の強度に関しては、初析  $L1_2$

相の体積率が重要な因子であること、加えて、初析L1<sub>2</sub>相とチャンネル部界面による強化機構が存在することを明らかにした。

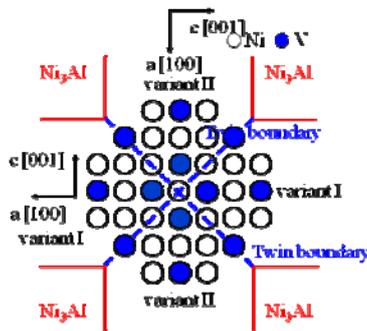


図1 チャンネル部のバリエーション構造の一例

3) 相安定性および状態図の研究より、Ti, Nb および Ta などが共析変態温度を上昇させて2重複相組織の安定温度域を高め、耐熱温度を向上させることを見出した。

4) 高温硬度や耐摩耗性がTaやRe添加により、耐摩耗や耐酸化特性が炭素ないし炭化物添加により向上することを見出し、それらの機構解明を行った。

5) Ni 基超々合金製高融点・硬質金属用摩擦攪拌接合ツール、ボールベアリング内外輪、さらには、タービンブレード材を試作し、良好な性能を確認した。

#### ○ Ni<sub>3</sub>(Si, Ti) および Ni<sub>3</sub>Si 基複相金属間化合物合金について

1) Ni<sub>3</sub>(Si, Ti) 単相組織において、  
・ Ta元素がTiサイトに置換するとき約6at%の固溶範囲を示し、著しい固溶強化が生じることを見出し、それが原子寸法効果によることを明らかにした。

・ 化学量論組成を制御しつつ、Al元素をTiサイトに置換させることにより、約6at%ものAlを固溶させることができ、軽量性と耐酸化特性が求められる用途に供される合金成分を開発した。

・ B, CおよびN元素の単独および複合添加により結晶粒界破壊が抑制され、本合金の高温加工性をさらに高めることに成功した。

2) Ni<sub>3</sub>Si相をマトリックスとして第2相を分散させることにより、塑性加工と高温強度のバランスに富む実用性の高い合金成分と組織を抽出することができた。

3) Ni<sub>3</sub>Si および Ni<sub>3</sub>(Si, Ti) がメタノール分解およびメタンの水蒸気改質反応に対して水素触媒活性を示すことを見出した。  
担持体/触媒粒子一体型の水素製造用装置創出に繋が



図2 Ni<sub>3</sub>(Si, Ti)合金を内外輪とした超耐熱・特殊環境用軸受

る成果を得た。

4) 耐摩耗、耐食、耐酸化に優れた Ni<sub>3</sub>(Si, Ti)合金をボールベアリング内外輪へ適用し、熱処理炉内あるいは腐食溶液中で運転できる搬送装置創製の道を切り拓いた (図2)。

#### 5. 今後の計画

##### ○ 2重複相金属間化合物合金 (Ni 基超々合金) について

① 組織形成機構のナノレベル尺度の解明とさらなる組織の進化、② 合金化挙動の解明と合金設計、③ 変形・破壊機構の解明、④ 多様な強化法の適用、⑤ 耐環境性の解明と向上、⑥ 素材製造法の確立 (企業と連携)、⑦ 応用展開 (企業と連携)

##### ○ Ni<sub>3</sub>(Si, Ti) および Ni<sub>3</sub>Si 基複相金属間化合物合金について

① 高温域における延性能改善、② さらなる強化機構の付与、③ 素材製造法の確立 (企業と連携)、④ 2次加工法の確立 (企業と連携)、⑤ 耐環境性の向上 (企業と連携)、⑥ 応用展開 (企業と連携)

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

##### 【発表論文】(計 35 件)

- ・ Effect of NbC Addition on Mechanical Properties of Dual two-phase Ni<sub>3</sub>Al-Ni<sub>3</sub>V Intermetallic Alloy, *Mat. Sci. Eng. A*, **527** (2010) 6012-6019, Y. Kitaura (他 2 名)
  - ・ Catalytic Properties of Cold-Rolled Ni<sub>3</sub>(Si, Ti) Intermetallic Foils for Methanol Decomposition, *Materials Transaction*, **51** (2010) 1002-1010, Y. Kaneno (他 8 名)
  - ・ Alloying Behavior of Ni<sub>3</sub>X-type GCP Compounds, *J. Alloys Compounds*, **496** (2010) 116-121. Sugimura (他 2 名)
- ##### 【学会発表】(計 50 件)
- ・ Superalloys (September 12-16, Awaji, Japan), Development of Dual Two-phase Intermetallic Alloys Composed of Geometrically Close Packed Ni<sub>3</sub>Al and Ni<sub>3</sub>V Structures (**invited**)

##### 【新聞発表】

- ・ 日刊工業新聞：平成21年8月21日  
「耐熱ボールベアリング600℃超でも稼働」
- ・ 日経新聞Webサイト(Tech-On):平成21年8月21日  
「大阪府立大など、内外輪の素材を工夫し玉軸受の耐熱性を向上」

##### 【受賞】

- ・ 第 7 回学術貢献賞 (日本金属学会) 平成 21 年 9 月
- ・ 第 50 回谷川・ハリス賞 (日本金属学会) 平成 23 年 3 月

ホームページ等

[http://takasugi-kaken\\_s.mtr.osakafu-u.ac.jp/index.html](http://takasugi-kaken_s.mtr.osakafu-u.ac.jp/index.html)