

## 燃焼合成反応を利用した TiAl 基複合材料の作製

キーワード：金属間化合物、TiAl、燃焼合成、複合材料、高強度化、高靱性化、in-situ 合成

### 概要

燃焼合成法を用いると、金属、セラミックスならびに金属間化合物をマトリックスとした複合材料が比較的容易に合成することができます。この燃焼合成法の特徴を解説すると共に、本方法を TiAl 基複合材料の作製に適用し、機械的性質を改善した結果について説明します。

### TiAl 金属間化合物

ある金属元素に別の元素を添加していくと、一般に硬くなっていくと同時に脆くなります。この元素の添加量を増加させていくと、構成している元素が簡単な整数比になったところで、合金とは別の特異な性質を有する相が出現します。これが、金属間化合物と呼ばれるものです。この特異性を活かそうとする研究開発が各方面で展開され、最近の身近な例としては、形状記憶合金が携帯電話のアンテナ線に使用されていることがあげられます。

今回取り上げる TiAl 金属間化合物は比重が小さく、比較的高温強度に優れていることから、700～900 で使用できる材料として用途開発が盛んに行われた結果、自動車用ターボチャージャーロータとして使用されるまでになりました。しかしながら、さらに過酷な環境下での使用を想定すると、高温強度がまだ十分でないなどの指摘もあります。この TiAl の強度向上を目的として、TiAl にセラミックス相が分散した複合材料を大阪府立大学と共同で開発した結果を紹介します。

### 燃焼合成法

今回複合材料を作製する方法として、燃焼合成法を採用しました。これは、2種類以上の物質が反応する際の生成熱を利用して化合物を合成する方法です。通常、原料には粉末

を用い、粉末混合圧粉体の一端を強熱すると反応が始まり、反応熱が生成します。この反応熱は周りを強熱するのと同等の効果を発揮するために、反応が連鎖的に伝播し、瞬時にして反応が完了します。このため、焼結のように長時間の加熱を必要としないことからコスト的に有利となります。また、原料に粉末を用いることから形状付与が可能であることも特徴です。金属間化合物は融点差や比重差が大きな元素、また活性な元素で構成されるものが多いこと、さらには難加工性であることもあり、燃焼合成法は金属間化合物の製造に適用するのに有利と言えます。

さらに、燃焼合成法は、複合材料の作製にも適した方法です。図1に示すように、原料

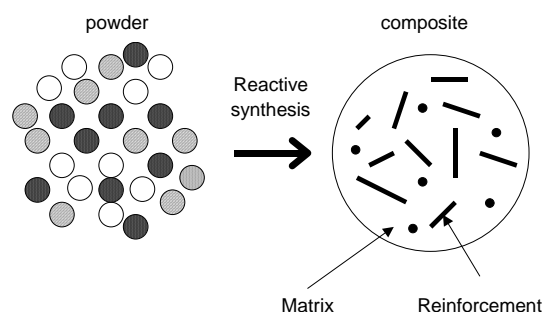


図1 燃焼合成法による複合材料作製の模式図

となる組成の粉末に、第3の元素あるいは化合物の粉末を添加すると、マトリックス相と共に、強化相であるセラミックス相が分散した組織が得られる、いわゆる in-situ 合成が

表1 TiAl 基複合材料の作製に用いる反応式

Ti+Al+C	TiAl+Ti <sub>2</sub> AlC
Ti+Al+AlN	TiAl+Ti <sub>2</sub> AlN
Ti+Al+B	TiAl+TiB <sub>2</sub>
Ti+Al+BN	TiAl+TiB <sub>2</sub> +Ti <sub>2</sub> AlN
Ti+Al+B <sub>4</sub> C	TiAl+TiB <sub>2</sub> +Ti <sub>2</sub> AlC

可能となります。今回、実際に TiAl 基複合材料に用いた反応を表 1 に示します。これ以外にも多くの反応が適用できる可能性があります。

しかしながら、燃焼合成法を構造材料の作製方法として利用するには致命的な欠陥があります。すなわち、粉末の圧粉体を燃焼合成させると、生成物は一般的に多孔体となってしまいます。これは、粉末表面に吸着した気相成分が反応時に放出されることや、圧粉体の理論密度が生成物のそれよりも小さい上に圧粉体の成形密度を上げるのに自ずと限界があることなどが原因です。いずれにしても何らかの方法を用いて緻密化する必要があるのですが、今回は次の二つの方法で行いました。一つは反応時あるいは反応後に外部から圧力をかけて緻密化する方法で、外部加圧の方法として HIP(Hot Isostatic Pressing)法を採用しました(HIP 反応焼結)。また、もう一つの方法は、新たに開発した、燃焼合成反応を誘起すると同時に、引き続いて溶解してインゴットを得る反応アーク溶解法です。

#### 複合材料の特性

表 2 に作製した複合材料の機械的性質を TiAl 単相材の結果と共にまとめます。なお、これら複合材料は気孔のない健全なものが作製できています。いずれの製法においても複合化することによって、強度ならびに破壊靱性値が向上していることが認められます。さらに、高強度化しているにもかかわらず、曲げ延性がそれほど低下していないことも注目

表 2 燃焼合成法によって作製された室温における TiAl の機械的性質

製法	組成	曲げ強度 (MPa)	曲げ延性 (%)	破壊靱性値 (MPa・m <sup>1/2</sup> )
反応 HIP	TiAl	635	0.2	11.2
	TiAl-18vol%Ti <sub>2</sub> AlC	700	0.5	13.0
	TiAl-18vol%(TiB <sub>2</sub> +Ti <sub>2</sub> AlN)	850	0.1	12.1
反応ア ーク溶 解	TiAl	440	0.5	11.5
	TiAl-3.3vol%Ti <sub>2</sub> AlN	730	0.95	14.9
	TiAl-17vol%Ti <sub>2</sub> AlN	800	0.3	14.8
	TiAl-3.5vol%Ti <sub>2</sub> AlC	730	0.83	14.8
	TiAl-18vol%Ti <sub>2</sub> AlC	870	0.71	14.0

されます。

反応アーク溶解法によって作製した TiAl/Ti<sub>2</sub>AlN 複合材料の組織と TiAl 単相材の組織を比較すると、TiAl 単相材の平均結晶粒径が約 200μm と大きく、しかも粒径のバラツキが非常に大きいものに対して、Ti<sub>2</sub>AlN が分散することによって平均粒径が 50μm 程度に微細化すると同時に粒径がそろってきているのが観察されました。これは、燃焼合成によって生成した Ti<sub>2</sub>AlN の融点があーク溶解の溶解温度よりも高いため、引き続き行われる溶解時にも分解することがなく、マトリックスが凝固する際の核形成サイトとして作用するために結晶粒が微細化、均質化したものと考えられます。このように、反応アーク溶解法によって作製した試料では、凝固過程を経ることにより、組織制御が可能となります。

一方、HIP 反応焼結法では、粉末冶金的手法を用いていることから、ニアネットシェイプ成形が特徴となります。また組織も粉末の性状に由来した特徴あるもので、このために高温での圧縮変形能に優れています。

以上のように燃焼合成法によって TiAl 基複合材料を作製すると、製造法、組織、セラミックス相の含有量などを調整することによって、機械的性質の制御が可能となります。

#### まとめ

燃焼合成法を用いて TiAl 金属間化合物マトリックスに各種セラミックスが分散した複合材料の作製方法を紹介しました。複合化することによって延性をそれほど損なうことなく、TiAl の強度、破壊靱性を向上させることができました。TiAl 金属間化合物は、軽量耐熱材料としての開発が中心ですが、今回紹介した TiAl 基複合材料を含めて、軽量でほどよくバランスした特性を生かして、軽量耐熱材料以外の用途を検討されるご相談をお待ちしています。