

# 金属間化合物のCO<sub>2</sub>レーザー溶接

大石憲司\* 山口 滋\*\* 瀬戸佐智生\*\*\*

## 1.はじめに

金属間化合物は従来からの金属材料や複合材料にはない優れた機械的比強度や耐熱性を併せ持つため、次世代の航空宇宙分野での構造材料として大きな期待が寄せられている。なかでもTiAlをベースにした金属間化合物は、本質的に高温場での耐性に優れた新材料として最近注目されている。<sup>1)</sup>しかし、この材料は種々の二次加工等を適用するのは困難で、とりわけ、溶接の適用は極めて困難な難接合材料であると位置付けられていた。

接合方法としてはこれまで拡散接合などの固相接合が検討されてきているが、一般に真空雰囲気と加圧と加熱装置を備えた大型チャンバーが必要であり、接合できる部品の大きさには制限がある。しかしながら構造材料としてTiAl金属間化合物を使用することを考慮すると、このような制約を取り去り、信頼性・汎用性の高い溶融接合技術の確立と適用が必要不可欠であるといえる。

レーザー溶接は、熱源のエネルギー密度と制御性が高く、溶接時の熱影響や熱ひずみを極めて小さくできるので、金属間化合物の溶融溶接も不可能ではない。TiAl金属間化合物のような材料については、近年、予熱温度及び溶接温度を適切に選択し冷却速度を制御することで溶接可能であると示唆する報告<sup>2)</sup>がなされた。このような研究の背景からTiAl基合金の用途拡大を念頭において、レーザー溶接技術の適用を本格的に検討する条件が整ってきたといっても過言ではないであろう。一方、数kWのCO<sub>2</sub>レーザーを用いたレーザー溶接の研究では、冷却速度による生成相と硬さの関係や凝固割れが生じやすいという問題点も指摘<sup>2)</sup>されていて、溶接条件や必要とする溶接後の材料特性を明確にする必要がある。

本報告では、TiAl金属間化合物を他の合金と比較して概説するとともに、この材料に汎用性の高い1kW級のCO<sub>2</sub>レーザーによる溶接を試み、Ar雰囲気中でTiAl薄板をビードオンプレート溶接し、レーザー溶接条件と溶接性との関連性を基礎的に実験・検討したことを述べる。

## 2. 金属間化合物材料

金属と金属とを組み合わせた金属間化合物は、数多くの種類が提案され研究されている。金属性の強い元素からなる金属性金属間化合物は、CuZnのように金属と区別できない特性を持つ一方、非金属性の強い元素の組み合わせはセラミックスと区別できない非金属性金属間化合物となる。非金属性の導入と共に原子の結合は強固になり、化合物は安定化する。これは剛性率・高温強度・耐蝕性・耐摩耗性などの向上をもたらす。しかし、伝導電子は減少し、熱・電気伝導性、延性、加工性の低下をもたらす。いい換えれば、金属間化合物は金属とセラミックスの中間的な特性を有する材料として位置づけられる。

表1 いろいろな金属間化合物<sup>3)</sup>

	金属	セラミックス
材料	CoTi CuZn	Ti <sub>3</sub> Al TiAl <sub>3</sub> NiTi TiAl NbAl <sub>2</sub> TiN

表2にTiをベースにした合金の特性を示す。TiAl基合金は、高温では超合金と同程度のヤング率と耐力を有し、しかも比重は半分以下である。TiAl基金属間化合物自体の耐酸化性は800℃を越えれば低下するが、第3元素添加により改善できるので1000℃まで使用できる。このようにTiAl基合金は、軽量かつ良好な耐熱性を持つ金属間化合物といえる。

TiAl基合金の材料に関する研究は、常温延性の改善を中心に進み、熱処理による組織制御技術が大きく発展したことによるであろう。常温延性の一層の改善や、高温強度の向上を可能にする組織制御法が、研究されつつある。

TiAl基合金における主な延性改善は、TiAl中のアルミニウム含有量をできるだけ減少させることと、TiAl中に少量のTi<sub>3</sub>Alを分散させることである。ここで、アルミニウム含有量の減少はTiAlが保有する非金属性の低下に役立ち、Ti<sub>3</sub>Alの分散は組織の微細化に寄与

表2 Tiをベースにした合金の特性<sup>4)</sup>

	Ti 合金	Ti <sub>3</sub> Al 基合金	TiAl 基合金	超合金
密度(g/cm <sup>3</sup> )	4.5	4.15~4.7	3.76	8.3
常温ヤング率(GN/m <sup>2</sup> )	110~96	145~110	176	206
900°Cのヤング率(GN/m <sup>2</sup> )	70*	110~90	140	150~140
クリープ耐用限(°C)	538	815	1038	1093
酸化耐用限(°C)	593	649	1038	1093
室温伸び(%)	~20	2~5	1~3	3~5
使用温度における伸び(%)	20~40	5~8	7~12	10~20

\* 650°Cにおける値

すると考えられている。また、混合する他の元素も延性のレベルで数種類の元素を添加することで、延性ばかりか、鍛造時の特性改善なども可能である。50 at % Tiと45 at % Alに添加する第3の元素として現在良く用いられているものは、鉄、マンガン、クロム、バナジウム、モリブデンである。材料に関する研究から、常温の延性がほぼなかったものが、現在では3%という値にまで向上してきたが、TiAl基合金の機械的特性や熱的特性は、金属というより、セラミクス材料のそれに近く、レーザー溶接時これらの点を常に考慮にいれて溶接条件等を検討する必要がある。

### 3. 実験方法

#### 3.1 共試材料

共試材料は、精密鍛造性に優れたFe、V、B添加のTiAlであり、鍛造後にHIP処理(1447K、150MPa、10.8Ks)を行ったものである。その化学組成を表3に示す。

表3 共試材料の化学組成(数値は原子%)

	Al	Fe	V	B	O	N	Ti
At%	45.9	1.27	1.24	0.31	0.12	0.03	Bal

試験片の形状は長さ60mm×幅25mm×厚さ2mmの薄板で、試験片の表面の凹凸を均一にするためにエミリー紙#600で研磨した。

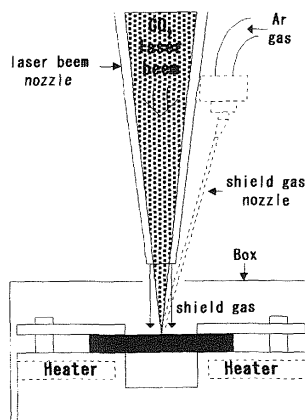
#### 3.2 レーザー溶接実験装置

図1に装置図を示す。実験ではCO<sub>2</sub>レーザー加工機((株)アマダ製CO<sub>2</sub>レーザー加工機LCF-644(発振器OLC-320h II)、発振方式;三軸直交方式、波長;10.6μm、最大出力;2kW、ビームモード;低次マルチモード)を使用した。

予熱温度及び溶接温度を適切に選択できるようにして

おくことは、加工の改善に役立つということが知られている。試料の両端をCuブロックで固定し、ブロック中にヒーターを取り付けて、加熱治具とした。その際、Arガスを用いて簡易的なシールドを行い(置換雰囲気)、供試材の酸化を防止することとした。溶接時の外気の混入は、1%程度と見積もることができる。

レーザービームと同軸のノズル(1次ノズル)からシールドガスとしてArガスを供給した。また、プラズマ除去を目的として溶接方向前方より、内径5mm、角度35°の2次ノズルからArガスを吹き付けた。試験はレーザーを254mmの焦点距離を持つレンズで集光させ、試験片下部で焦点を結ぶように焦点はずし距離-2mmとしてビードオンプレート溶接を行った。



#### 3.3 溶接試験片評価

溶接後試験片のビード表面の割れを調べるために染色探傷試験を行った。その後、溶接方向に対して垂直に切断し、切断面を鏡面研磨した後、フッ硝酸(HF:HNO<sub>3</sub>:H<sub>2</sub>O=2:2:96)で腐食し、マイクロ組織観察を行った。さらに、試験片の溶け込み深さおよびビード幅を測定したのち、マイクロピッカー硬度測定(荷重:200gf、負荷時間:15s)を行った。その後、溶接速度3000mm/minの試験片のX線回折による解析を行った。

### 4 結果および考察

溶接条件を導くには溶接能力の評価が良く、溶接欠陥がないものが望ましい。そこで、はじめに溶接割れに関連性について溶接可能範囲を特定し、次に溶接可能範囲でポロシティーの関連性について実験検討を行った。

#### 4.1 溶接可能範囲

図2に溶接速度とアスペクト比の関係を示す。溶接速度や加熱温度にかかわらずアスペクト比は約1.1付近で一定であることがわかった。また、完全溶融しビード幅が広がりアスペクト比が小さくなるような条件では、終端側のビードもしくはクレータで縦割れが確認された。これは、アスペクト比の悪化により、表面の収縮応力と裏面の収縮応力の差が大きくなると角変形を起こし、変形量が大きくなった場合に治具の拘束により割れが発生するものと推定できる。

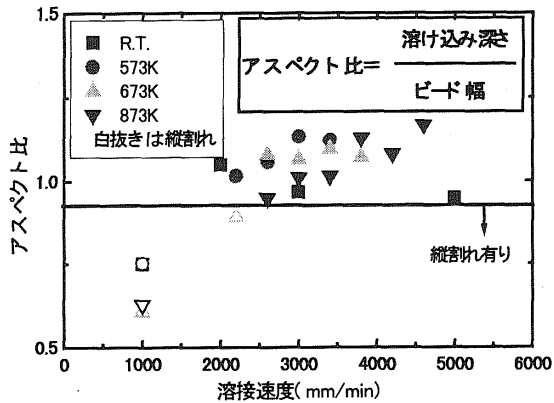


図2 溶接速度とアスペクト比の関係

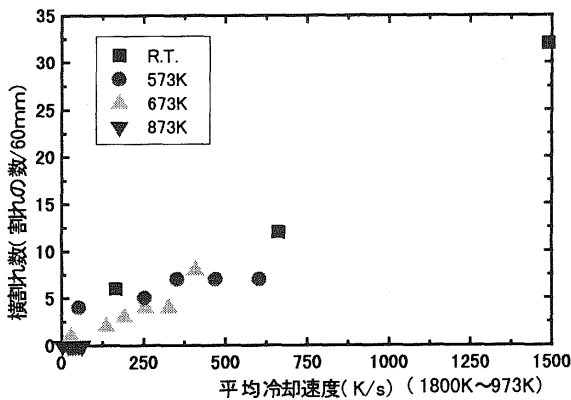


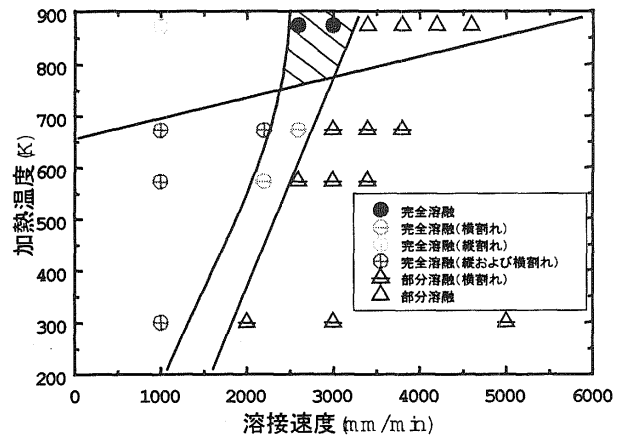
図3 冷却速度と割れの関係

冷却速度と割れの関係を図3に示す。この図の横軸は、レーザーによる熱を移動線状熱源による二次元熱流と仮定し、準定常状態の冷却の時間変化を計算し、融点

からTiAlの延性がほとんどなくなる温度(973K)までの平均冷却速度である。このように横割れの単位長さあたりの数と平均冷却速度には良い相関関係があることがわかった。

予熱温度及び溶接速度を適切に設定すれば延びの少ない材料でも十分レーザー溶接ができることが明らかになった。図4に出力1.5kW、Ar雰囲気中でのTiAlの板厚2mmにおける溶接可能範囲を示す。部分溶融である範囲、縦割れを生ずる範囲、横割れを生ずる範囲を除くと、図中斜線の範囲が本実験材料の良好な溶接領域である。

図4 TiAlの溶接可能範囲(レーザー出力1.5kW)



#### 4.2 溶接部の硬さ

同じ溶接速度域で加熱温度に対する硬さの変化を測定すると被加工材料の温度が室温(R.T.)のものが一番硬く、加熱温度を573K、673Kと上げていくと硬さは低下するが873Kでは再び溶接部は硬くなることがわかった。

溶接時の酸素のとけ込みも影響は少ないと考えられるので、この硬さの変化の原因を調べるために溶接速度3000mm/minの試験片の溶融部を切り出しX線回折による測定を行った。特に測定では、溶融部に形成される特徴的な $\gamma$ 相・ $\alpha_2$ 相といわれる相に着目した。解析結果を図5に示す。母材では $\gamma$ 相のメインピークが高く $\alpha_2$ 相のピークは低い。しかし、硬さが大きかった常温で溶接した試験片では $\gamma$ 相のピークが低くなり $\alpha_2$ 相のピークのほうが大きくなっていることがわかった。また、加熱温度を573K、673Kと上げていくと $\gamma$ 相のピークは高くなり $\alpha_2$ 相のピークは下がって行くが、873Kでは再び $\alpha_2$ 相のピークが高くなっていることから、 $\alpha_2$ 相と硬さの変化には関連性があるものと考えられる。

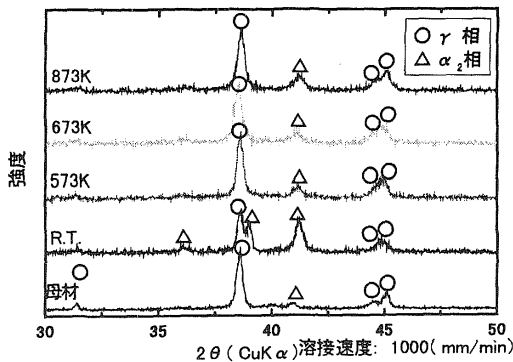


図5 X線回折による解析結果の一例

#### 4.3 ポロシティー

レーザー溶接部ではポロシティーが発生しやすく、その原因は、キーホール型の溶融池の深さ（溶け込み深さ）に対するビード幅の比、すなわちアスペクト比の大きいビード断面形状とレーザービームとの相互作用により金属蒸気が発生しやすいことによる。レーザー溶接金属中に溶解したシールドガスや雰囲気から巻き込まれた $O_2$ および $N_2$ は凝固に伴い放出されるが、溶け込みの溶接金属では固液界面で形成された気泡が表面に浮上する前に固相内にトラップされ易く、これがポロシティーの原因となることはよく知られている。

図6に2次ノズルから供給されるシールドガス（Ar）の流量とポロシティーの関係を示す。

2次ノズルは不活性ガスの領域の大きさを制御することも目的として、ノズル径2mmおよび4mmの場合について実験をおこなった。いずれのノズル径でも、15~25l/minの範囲でポロシティーは消失することが分かった。ビデオ撮影による観測でも、この流量でプラズマプルームの発生領域が十分小さくなることが確認できている。また、ノズル径を大きくするとポロシティーが減少することが分かった。これはシールド領域が拡大することによって大気巻き込みを減少する効果によるものと考えられる。ただし、2次ノズル径が8mmの場合には、ポロシティー数が無いことは貫通溶融はできなかったことを示している。25l/min流量を供給してもレーザー照射部分へのシールドガスの供給が十分ではなく、プラズマプルームを除去できなかったため、レーザービームを吸収しての貫通溶融はできなかった。

これらのシールドガス流量変化とノズル径変化の実験から、ポロシティー形成は、プラズマプルームによるレーザーの材料への吸収変化が大きく影響することがわかった。

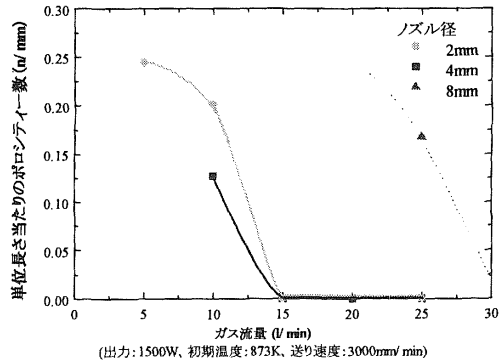


図6 ガス流量とポロシティーの関係

#### 5. まとめ

Ar雰囲気中でTiAl薄板をビードオンプレート溶接し、レーザー溶接条件と溶接性との関連性を基礎的に実験・検討した。材料の加温は、冷却速度を制御し割れを防ぐという点で重要であるが、特に平均冷却速度を指標にすると割れを制御できることが示され溶接条件をある程度容易に特定できることが明確となった。溶接条件は出力1500W、送り速度2500~3000mm/min、初期温度873K、ノズル径2mmおよび4mmのガス流量15~20l/minにおいて最適なビードオンプレート溶接が可能となった。

常温延性の小さな材料、薄板の良好なレーザー溶接条件が明らかとなるとセラミックスの精密接合やその他の金属間化合物、超伝導材料などの接合技術へと展開が可能となるものと期待している。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご助言をいただいた大阪大学工学部 接合科学研究所 松縄 教授、片山 助教授に深く感謝いたします。また、実験にご協力いただいたアマダエンジニアリングセンターの高崎 主任にも感謝をいたします。

#### 参考文献

- 1) 橋本敬三、“耐熱チタンアルミナイド”、材料科学、Vol.36、(1999)、p35
- 2) 廣瀬明夫、有田吉宏、小林紘二郎、“TiAlのレーザー溶融加工における溶融凝固部の組織変化と機械的特性”、材料、Vol.44、(1995)、No.504、p.1145
- 3) 日本材料学会編 金属間化合物と材料、裳華房、(1995)
- 4) K.Uenishi, K. F. Kobayashi: Proc. 3rd Japan International SAMPE Symposium, Chiba, (1993) p.1083

\* 東海大学 理学部物理学科 (院生)  
 \*\* 理学部物理学科 助教授  
 \*\*\* 工学部材料科学科 主任教授