

テラードビームを用いたレーザーブライジングに関する研究

大阪大学・工・生産科学専攻 宋 宇鉉、西本和俊、才田一幸

1. はじめに

純国産ロケットH-AのメインエンジンであるLE-7AおよびLE-5Bのノズルスカート冷却管の接合には、同種の部品を一度に大量に接合できること、接合による歪が溶融溶接に比べて格段に小さいこと、母材を溶融させることなく薄肉・複雑構造物の接合が可能であるなどの理由から低圧アルゴンガス雰囲気中で炉中ろう付による接合が行われている。ノズルスカート冷却管に用いられている材料はA286あるいはInconel 600であり、Ag-10%Pd、Ag-21%Cu-25%PdおよびAg-28%Cu-20%Pdでろう付されている。そして、現在、このAgろう付部および冷却管に不具合が生じた場合は、Au-18%Niろう材を用いた手動TIGによるブレイズ溶接により補修が行われている。現行の手法では、ロケットエンジンのノズルスカートは非常に大きく、炉中ろう付では均一なろう付が難しく、エロージョンにより母材が侵食されるという現象が生じることがあるという問題を内包しており、TIGを用いたブレイズ溶接では、母材への影響が激しく溶け込みが大きい、継手の変形が大きい、施工にあたり熟練工が必要等の問題を内包している。

そこで、本研究では、これらの問題を解決するため、ノズルスカート冷却管およびろう付継手に対する新しいろう付および補修ろう付手法として、LDレーザを用いた“LDレーザろう付法”の確立を目的としている。

2. 供試材料および実験方法

本研究では、母材としてInconel 600を用いた。その化学組成を表1に示す。また、ろう材はAu-18%Ni、Ag-10%PdおよびAg-21%Cu-25%Pdを用いた。

表1 母材の化学組成 (mass%)

Alloy	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Co	Mo	Al	Ti	B	Fe	V
Inconel 600	0.08	0.25	-	-	-	Bal.	15.5	-	-	-	-	-	8	-

2-1 実験方法

2-1-1 レーザろう付方法



図1
レーザーろう付方法

レーザーブライジングには多関節ロボットに取り付けた定格出力2.0kWのLDレーザを用いて、図1に示すように、ろう材をレーザの走行方向前方より供給しながら、大気中で実施した。本研究におけるレーザーろう付条件を表2に示す。

表2 ろう材種類の従うLDレーザろう付の条件

Base metal	Inconel600		
	Filler metal Au-18%Ni	Ag-10%Pd	Ag-21%Cu-25%Pd
Laser power (W)	260-350	350-450	280-350
Defocus length (mm)	3	3	3
Travelling velocity (mm/s)	3	3	3
Wire feeding speed (mm/s)	20-30	20-30	20-30
Vf/Vw	6.6-10	6.6	20-30
Wire feeding position (mm)	0	0	0
Gas flow rate(l/min)	15	15	15
Weaving Amplitude (mm)	1.0-2.0	1	1.0-2.0
Weaving Frequency (Hz)	4	4	4

2-1-2 組織観察方法

接合部の組織観察面を、Au-18%Niろうは10%シアン化カリウム水溶液中5V×60sの電解腐食により、Ag-10%PdおよびAg-21%Cu-25%Pdろうは25%アンモニア水溶液と30%過酸化水素水を1:1の割合で混合した腐食液に20s浸漬することにより、母材はマーブル試薬 { CuSO₄(20g)+HCl(100ml)+H₂O(80ml)+H₂SO₄(5ml) } に10s浸漬させることにより、化学腐食を施し、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: 以後(3) SEMと記す)を用いて組織観察を行った。

2-1-3 硬さ試験方法

マイクロピッカー硬さ試験機を用いてろう付部の硬さ分布を測定した。このときの荷重は0.098Nとし、レーザーろう付部およびスリット試験片に対するレーザーブレイズ補修溶接部に関しては、ろう層内部から母材にかけて、Ag-Pd系ろう付突合せ継手に対するレーザーブレイズ補修溶接部に関しては、ブレイズ溶接部からAg-Pd系ろう原質部にかけて硬さ分布を測定した。

2-1-4 元素分析方法

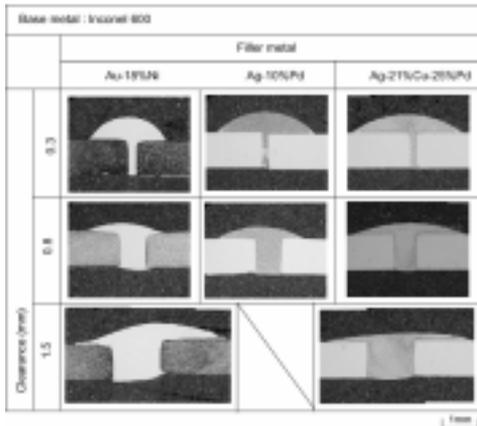
各元素の分布状況を調査するため、波長分散型X線分析装置 (Electron Probe Micro Analyzer: 以後EPMAと記す)による面分析を行った。

2-1-5 引張試験方法

接合部の機械的特性を調査するため、オートグラフを用いてレーザーブライジング継手の引張試験を行った。引張速度は1.0mm/minとした。また、突合せレーザーろう付継手はこのとき、ろう付部の余盛を削除し引張試験に供試したが、レーザーブレイズ補修溶接継手の場合は、実機の状態に近づけるため、余盛を残した状態で引張試験に供試した。

3. 接合性に及ぼさるう付間隙の影響

板厚 1mm の Inconel600 平板試験片を用いて、Au-18%Ni、Ag-10%Pd および Ag-21%Cu-25%Pd ろうによる突合せレーザーろう付試験を実施し、接合性に及ぼさるう付間隙（クリアランス）の影響について検討した。試験に際し、母材にはフラックス F10SU を塗布した。クリアランスを変化させたときのろう付部断面を **図 2** に示す。本レーザーろう付条件範囲においては、Au-18%Ni ろうを用いた場合、クリアランスが 0.3mm 未満になると、間隙にろう材が流入せず、ろう付部にろう材が充填しないが、クリアランスが 0.3~1.5mm では、母材の溶解が若干認められるものの、ろう付間隙にろう材が完全に充填する。また、クリアランスが 1.5mm より大きい条件では、レーザーろう付時に溶解したろう材が両側の母材に付着し、間隙にろう材を充填することができない。同様に、Ag-10%Pd ろうを用いた場合はクリアランスが 0.3~1.0mm でろう付間隙にろう材が充填した。Ag-10%Pd ろうを用いた場合は Au-18%Ni ろうを用いた場合と比較し、母材上面のクリアランス部分の角が丸くなっておらず、母材の溶解が幾分少ないことが窺える。Ag-21%Cu-25%Pd ろうを用いた場合は 0.3~1.5mm のクリアランスにおいて、若干の母材溶解は見られるものの、ろう付間



隙にろう材が充填した。

図 2

クリアランスを変化させたときのろう付部断面組織

4. レーザろう付部の組織解析

4-1 レーザろう付部の組織観察

まず、Au-18%Ni 突合せレーザーろう付継手において、クリアランスが 0.3mm の場合のろう付部組織を **図 3** に示す。母材近傍 (Region A, Region B および Region C) では母材側から成長しているセルラードライトが確認でき、母材から離れたろう層中央部 (Region D) では、セル状の組織が確認できる。次に、Ag-10%Pd 突合せレーザーろう付継手において、クリアランスが 0.3mm の場合のろう付部組織を **図 4** に示す。Ag-10%Pd を用いたレーザーろう付部は Au-18%Ni の場合と異なり、ろう層全域にわたり際立った組織的際は認められない。また、クリアランスの変化に伴う組織の際立った変化も確認できない。さらに、Ag-21%Cu-25%Pd 突合せレーザーろう付継手において、クリアランスが 0.3mm の場合のろう付部組織を **図 5**

5 に示す。母材近傍は黒く見える母材に沿って存在する帯状の相、島状の相およびその周りを囲むように存在する白く見える相からなる。クリアランスが大きい場合、島状の組織が粗大化するようである。ろう層中央部は、クリアランスが大きい場合の黒く見える組織と比較して、非常に小さな黒っぽく見える島状の相とその周りを囲むように存在する白く見える相からなる。また、ろう層中央部においてはクリアランスの変化に伴う際立った組織変化は確認できない。

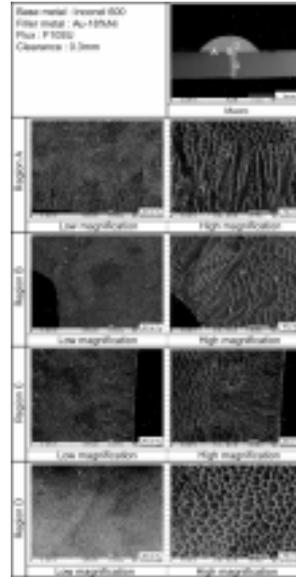


図 3

Au-18%Ni のろう材を用いたろう付部組織

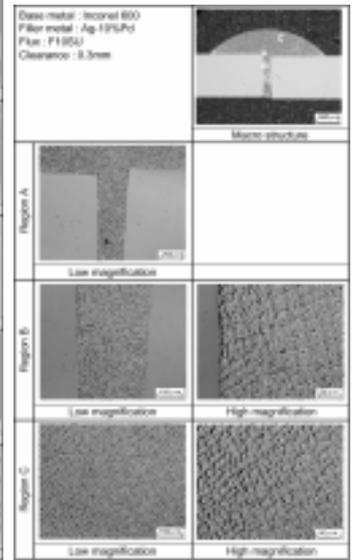


図 4

Ag-10%Pd のろう材を用いたろう付部組織

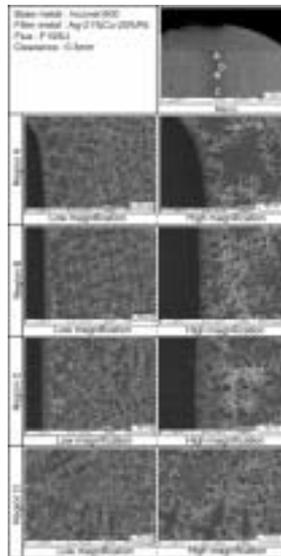


図 5

Ag-21%Cu-25%Pd のろう材を用いたろう付部組織

4-2 レーザろう付部の元素分析

Au-18%Ni 突合せレーザーろう付継手において、クリアランスが 0.3mm の EPMA によるろう付部の面分析結果を **図 6** に示す。母材近傍のろう層では組織観察において確認された dendrite の内部に Ni が多く、境界部分には若干 Ni が少なくなっていることがわかる。ろう層中央部でも同様に、セルの内部に Ni が多く、セルの境界部分には若干 Ni が少ないことがわ

かる．母材元素である Cr および Fe は，母材近傍のろう層において若干存在が確認できる．Ag-10%Pd 突合せレーザーろう付継手においては，ろう層内部はデンドライト模様によって若干 Ag が富化した領域と Pd が富化した領域が存在する．ろう層内の母材元素はろう層内に均一には存在せず，微小な点状の別の相となる．また，Ag-21%Cu-25%Pd 突合せレーザーろう付継手においては，組織観察において確認された母材との界面に存在する帯状の相および界面近傍の島状の相は Cu および Pd が富化した相であり，それを囲むように Ag が富化した相が存在している．また，ろう層中央部においては，母材近傍と比較して細かいものの，微細な Cu 富化相と Ag 富化層が確認できる．また，母材元素である Ni, Cr および Fe は Cu 富化相において確認できるが，Ag 富化相にはほとんど存在しない．

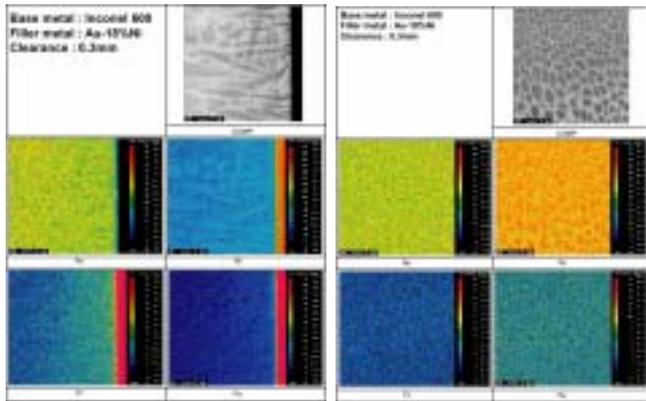


図6 Au-18%Ni のろう材を用いた EPMA 分析した結果

4-3 レーザろう付部の硬さ分布

Inconel 600 平板試験片に対するレーザーろう付部の母材からろう層にかけて水平方向の硬さ分布を図7に示す．ろう材が Au-18%Ni の場合はろう層が母材よりも硬くなっているが，ろう層内での硬さはほぼ一定であり，ピッカース硬さは 280HV ~ 290HV である．ろう材が Ag-10%Pd の場合はろう層は母材よりかなり軟らかく，60HV 程度であるが，Au-18%Ni の場合と同様にろう層内の硬さはほぼ一定であった．ろう材が Ag-21%Cu-25%Pd の場合は，クリアランスが小さいとき，ろう層は母材よりも硬いが，ろう層内での硬さ変化はほとんどない．しかし，クリアランスが 1.0mm の場合，母材近傍のろう層において，母材より硬化した相と軟化した相が複雑に混在している領域が存在する．

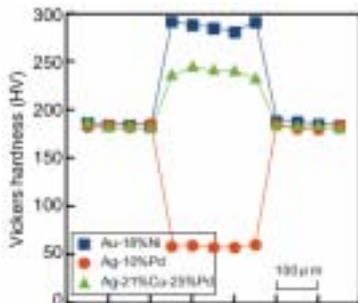


図7 レーザろう付部の硬さ分布

5. レーザろう付部の引張強さに及ぼすクリアランスの影響

5-1 レーザろう付継手の引張試験

クリアランスを変化させた突合せレーザーろう付継手 (F10SU フラックス使用) に対し，常温で引張試験を行った．レーザーろう付継手の引張強さとクリアランスの関係を図8に示す．Au-18%Ni を用いたレーザーろう付継手の引張強さは，本実験の範囲ではクリアランスによらず，660MPa 程度で一定である．Ag-10%Pd を用いたレーザーろう付継手の引張強さは，クリアランスが 0.3mm の場合が最も高く 370MPa であるが，クリアランスの増加とともに引張強さは低下し，クリアランスが 1.0mm の場合は 220MPa となる．Ag-21%Cu-25%Pd を用いたレーザーろう付継手の引張強さは，クリアランスが 0.3mm および 0.5mm の場合は 660MPa であるが，クリアランスが 0.8mm，1.0mm および 1.5mm の場合は約 600MPa に低下する．

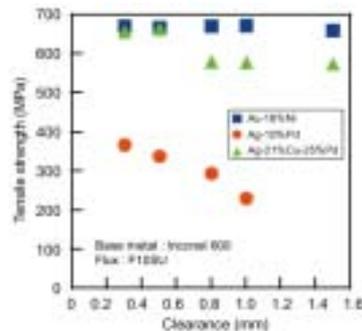


図8 レーザろう付継手の引張強さとクリアランスの関係

5-2 引張試験片の破断面解析

レーザーろう付継手の引張試験後のマクロ様相を図9に示す．引張試験後のレーザーろう付継手は，明らかに母材部分で破断したもの (Type A)，明らかにろう層中央部で破断したもの (Type B) および母材とろう層の界面近傍部で破断したもの (Type C) がある．母材とろう層の界面付近で破断した場合の破断位置を特定するため，破断面断面を観察した．破断面断面を図10に示す．母材側の破断面は周りの部分よりやや白っぽく見える相である．ろう層側の破断面も黒っぽく見える島状の相を囲むように存在する白っぽく見える相である．破断面形態ごとに破断のミクロ組織を観察した．破断面を図11にまとめて示す．Type A および Type B の破断面は全域にわたり延性的なディンプル破断面である．Type C の破断面は，一部平滑な脆性破断面が見られるものの，破断面の大部分は Type A および Type B の場合と同様にディンプル破断面である．

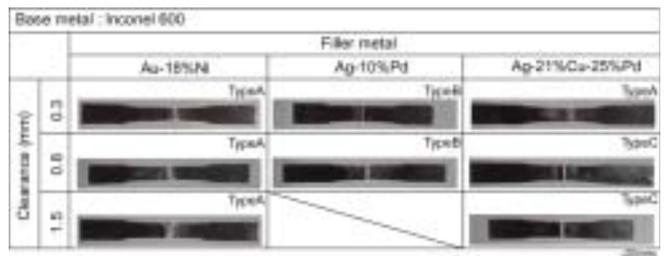


図9 レーザろう付継手の引張試験後のマクロ組織

Fracture position of Inconel 600 / Ag-21%Cu-25%Pd / Inconel 600 laser brazed joint (Clearance : 1.0mm)

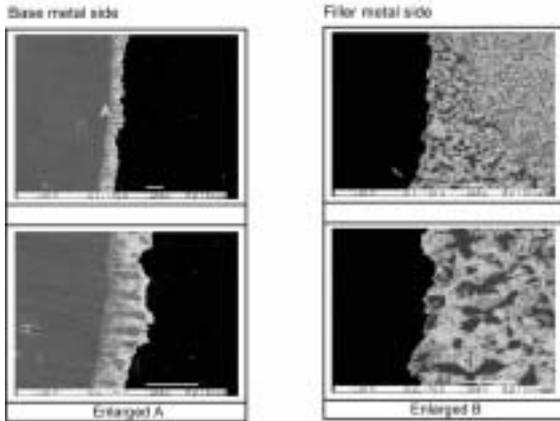


図10 母材側及びろう層側の破断部断面組織

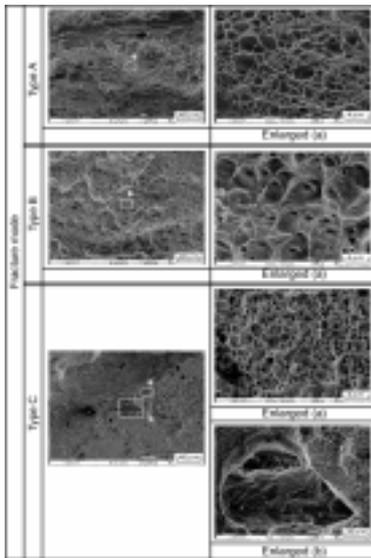


図11 破断形態に伴うマイクロ破面組織

5-3 液滴ろう材の温度とビード形態

レーザブレイジング時のビード形成現象は、液滴ろう材温度および母材表面温度に依存すると考えられ、液滴ろう材の温度測定した結果、液滴ろう材の下部温度と外挿された母材表面温度がほぼ一致する。そこで、液滴の温度とビード形成状況の関係を明らかにするため、液滴温度によりビード幅、余盛止端角および母材の溶け込み幅を整理した結果をそれぞれ図12、図13および図14に示す。ビード幅は液滴温度の上昇に伴い広がる。余盛止端角は液滴温度の上昇に伴い小さくなる。母材の溶け込みの幅は液滴温度の増加に伴い大きくなるが、 V_f/V_w 変化に伴う母材の溶け込みは幅の変化はほとんどない。また、適正レーザろう付条件を余盛止端角 60° 以下、母材溶け込み幅を 0.1mm 以下とする(図13および図14にあわせて示す)と、適正レーザろう付条件時の液滴ろう材の温度範囲は $1350\sim 1450\text{K}$ となる。

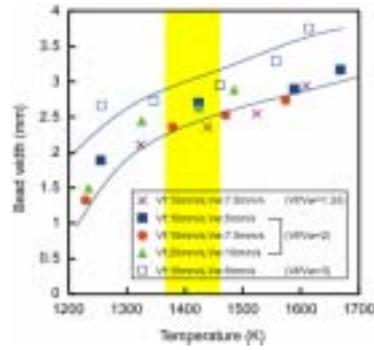


図12 液滴の温度とビード幅の関係

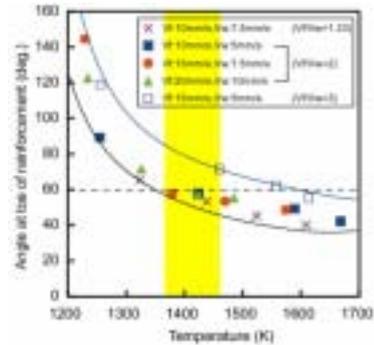


図13 液滴の温度と余盛止端角の関係

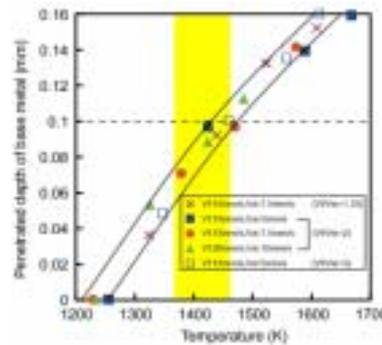


図14 液滴の温度と母材の溶け込み幅の関係

6. 終わりに

一般にレーザろう付時のビード形成現象は、液滴ろう材の温度や母材表面温度など多くの因子に依存すると考えられるが、本研究では、液滴温度によりビード形態をおおむね整理することが可能であった。これは、母材表面の温度上昇の主たる要因が、レーザによる直接加熱よりむしろ、液滴ろう材の保有熱量による加熱であることを示唆するものである。また、炉中でろう付を行う場合、ろう付温度は通常ろう材の融点 $+50\sim 100\text{K}$ であるが、レーザろう付時の液滴温度は Au-18\%Ni の融点よりも $150\sim 300\text{K}$ も高い値を示す条件範囲で良好なろう付が実現できた。ろう付時の液滴温度がかなり高いにもかかわらず、レーザろう付時のエロージョン量はそれほど大きくない。これはレーザろう付が、高エネルギー密度のビームによる局所加熱に伴う急熱急冷過程であるため、母材とろう材の間の界面反応が抑制されたためであると推察される。