

# タービン翼ろう付補修技術の開発

## Development of Brazing Repair Method for Damaged Turbine Nozzles

大 岩 直 貴 技術開発本部生産技術センター生産技術開発部  
錦 織 貞 郎 技術開発本部生産技術センター生産技術開発部 部長 博士（工学）

ジェットエンジンのタービン翼は運転によって割れなどの損傷が発生する。この補修に際し、精密鑄造 Ni 基超合金製のタービン翼は、一般的に割れ感受性が高いため溶接の適用は難しく、ろう付が適用される。今回、クリープ特性とともに熱疲労特性に着目したろう付補修技術を開発した。ろう付部を微細組織化することで、熱疲労試験におけるクラック発生、伝播経路が変化し、優れた特性が得られることを明らかにした。

Turbine nozzles of jet engines are damaged by the thermal fatigue cycle during operation. The turbine nozzle is fabricated from nickel base superalloys, which usually exhibit high crack sensitivity for fusion welding, so brazing is applied to repair of these turbine components. The study objectives were improvement of creep and thermal fatigue properties. Fine dispersal microstructures in the brazed area are effective to improve the thermal fatigue property. The crack path after the thermal fatigue test was changed from inside the brazed area to the interface between the brazed area and the parent material, so that the specimen had better fatigue properties.

### 1. 緒 言

ジェットエンジンのタービン部品に用いられる Ni 基超合金は、耐熱性確保などを目的にレアメタルが添加され高価な材料である。タービン部品の使用環境は過酷であり種々の損傷を受けるが、可能な限り修理を施し再利用することが望ましい。タービン部品の損傷原因は、主にエンジン運転時の熱疲労によると考えられているにもかかわらず、これまでの開発動向を精査すると、ろう付部のクリープ特性に着目したものがその大半を占める<sup>(1)~(4)</sup>。

一般に、Ni 基超合金は多量の Al, Ti が添加されているため熔融溶接が難しく、修理や接合にはろう付が広く適用される<sup>(1)~(4)</sup>。そこで本稿では、熱疲労特性向上を目的としたろう付修理技術の開発を行い、優れた機械的特性を得たので、その概要を報告する。

### 2. 試験方法

供試母材として Ni 基超合金 Rene125 多結晶材（以下、Rene125 母材と呼ぶ）を用いた。第 1 表に供試母材の化学組成を、試験に用いたろう材および合金粉末の成分と併せて示す。第 1 図に一般的なろう付修理模式図を示す。

本稿では、ろう材粉末を MarM247 合金粉末およびバインダと混合しペースト状として、へらを用いてクラックを

模擬した間げきへ充填した。ろう付は真空炉中で脱バインダ処理、均熱化処理後、1 200℃で 15 分間保持した。引き続き炉冷し拡散処理を実施した後に、Rene125 母材の時効熱処理である 1 079℃× 4 h, 815℃× 16 h の条件で熱処理を行った。

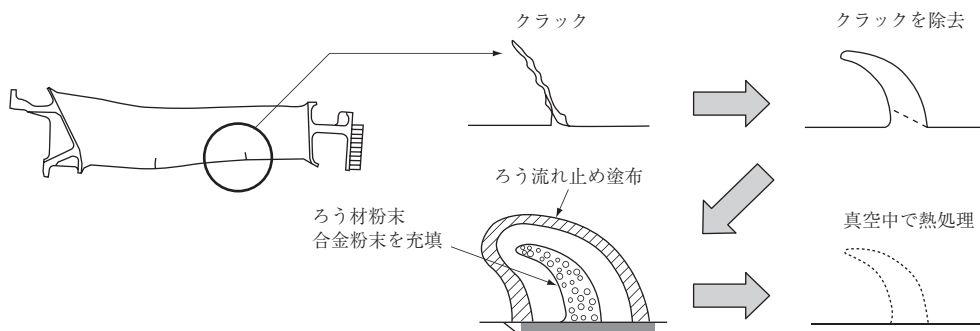
クリープ試験は、平行部径 3.0 mm, 標点間距離 15.0 mm のつば付き試験片を用いた大気中での試験と、平行部幅 2.0 mm, 厚さ 1.0 mm, 標点間距離 12.0 mm の小型板状試験片を用いた Ar 雰囲気中での試験を実施した。いずれの試験においても、ろう付部は試験片平行部の中央に位置する。試験条件は、980℃× 69.3 MPa と 870℃× 150 MPa の 2 条件とした。

熱疲労試験はひずみ制御で行い、プログラムで温度サイクルのみを与えた。試験片は熱膨張および収縮の結果、圧縮および引張りの応力が負荷される。このとき、試験片平行部に伸び計を取り付け、標点間の変位をゼロに制御する試験、すなわち拘束率  $\eta = 1$  の試験を実施した。標点間距離は 15.0 mm とした。昇温速度および温度範囲は 400℃/min, 550℃ ⇄ 950℃ とし、三角波で温度サイクル波形を与えた。

熱疲労試験の進行に伴い、引張荷重がピーク荷重より 5% 低減したサイクルでクラックの発生とみなした。ろう付まま材およびクリープ、熱疲労試験後の組織観察は、光

第 1 表 供試母材の化学組成 (単位: wt%)  
Table 1 Chemical composition of applied materials (unit: wt%)

| 供試材料         | 元 素 |        |      |         |         |         |     |     |     |      |      |         |        |
|--------------|-----|--------|------|---------|---------|---------|-----|-----|-----|------|------|---------|--------|
|              | Ni  | Co     | W    | Cr      | Al      | Ta      | Hf  | Ti  | Mo  | C    | Zr   | B       | Si     |
| Renel25 母材   | 残部  | 10.0   | 7.0  | 8.9     | 4.8     | 3.8     | 1.6 | 2.5 | 2.0 | 0.11 | 0.05 | 0.015   | -      |
| MarM247 合金粉末 | 残部  | 10.0   | 10.0 | 8.3     | 5.5     | 3.0     | 1.5 | 1.0 | 0.7 | 0.15 | 0.05 | 0.015   | -      |
| 開発ろう材粉末      | 残部  | 0 ~ 10 | -    | 15 ~ 19 | 0 ~ 3.5 | 0 ~ 3.5 | -   | -   | -   | -    | -    | 0 ~ 2.3 | 0 ~ 10 |



第 1 図 タービン静翼に発生するクラックとろう付修理模式図  
Fig. 1 Schematic illustration of crack at turbine nozzle and brazing repair process

学顕微鏡および SEM (走査型電子顕微鏡) を用いた。組成分析は EPMA (X 線マイクロアナライザ) を使用した。硬度測定はマイクロビッカース硬度計を用いて実施した。




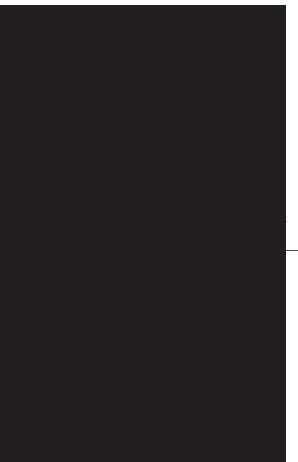
### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 熱疲労特性に着目した組織制御

第 2 図に種々の B, Si 添加量におけるろう付部組織を示す。ろう材融点を母材より低く設定するため B や Si といった融点降下元素を添加している。したがって、これ

らの元素が Ni 基超合金に含まれる W や Cr などの元素と結合し、図中白く観察される分散相を形成する<sup>(1)</sup>。これらの分散相は硬くてもろく、疲労特性に悪影響を及ぼすので、これらを可能な限り低減する組織制御を試みた。

Si は B と比較して Ni に対する固溶度が大きいことから、B から Si へ積極的に置換することで分散相を低減できると考えられる。その添加量に応じ、第 2 図に示すように A 材 (- (a)), F 材 (- (b)), E 材 (- (c)) および B 材 (- (d)) と呼ぶ。予測に従い、B を減じ Si をバ

| (a) A 材   | (b) F 材   | (c) E 材  | (d) B 材   |
|---|---|--|---|
| B : 0%, Si : 10%  | B : 0.6%, Si : 7.5%   | B : 1.2%, Si : 5.0%  | B : 2.3%, Si : 0%   |
|  |  |  |  |
| 20 μm   | 20 μm   | 20 μm  | 20 μm   |

第 2 図 種々の B, Si 添加量におけるろう付部組織  
Fig. 2 Microstructure of brazed area for several B and Si contents

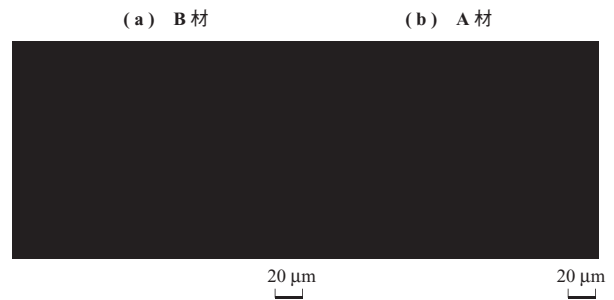
ランス添加させていくと、分散相の微細化および体積率の減少が認められた。特に E 材では粒界上の分散相の大きさは  $3\ \mu\text{m}$  程度と微細化され、その体積率も最小となった。

一方、Si の添加量がある水準を超えると、再び分散相が大きくなる傾向が認められた。EPMA での分析から、粒界上の分散相の組成は、B 材および E 材では W, Cr のほう化物であり、A 材および F 材では Ni, W, Cr の炭けい化物であった。すなわち、Si への置換率が大きくなると主たる分散相の組成が異なる。分散相およびマトリクスの微細化という着目点から、E 材が最も優れた疲労特性を示すと予測される。

### 3.2 ろう付部のクリープ特性

3.1 節に述べた組織的特徴をもつろう付部について、クリープ特性を評価した。試験片のろう付部の幅は  $1.0\ \text{mm}$  とした。ここで Ni 基超合金においては、B は粒界強化元素として添加される。したがって、組織微細化の目的で B を Si へ置換したことによって、クリープ弱화가懸念される。 $980^\circ\text{C} \times 69.3\ \text{MPa}$ , Ar 雰囲気中のクリープ試験において、その破断時間は、B 材と E 材がそれぞれ 157, 116 h と同程度のクリープ特性を示す一方で、F 材は 28 h, A 材では 5 h とより短時間で破断した。

第 3 図に、クリープ加速域で試験を中断した試験片のろう付部の組織を示す。B 材 (第 3 図 - (a)) および E 材では、クリープ加速域においてもろう付部内に顕著なク

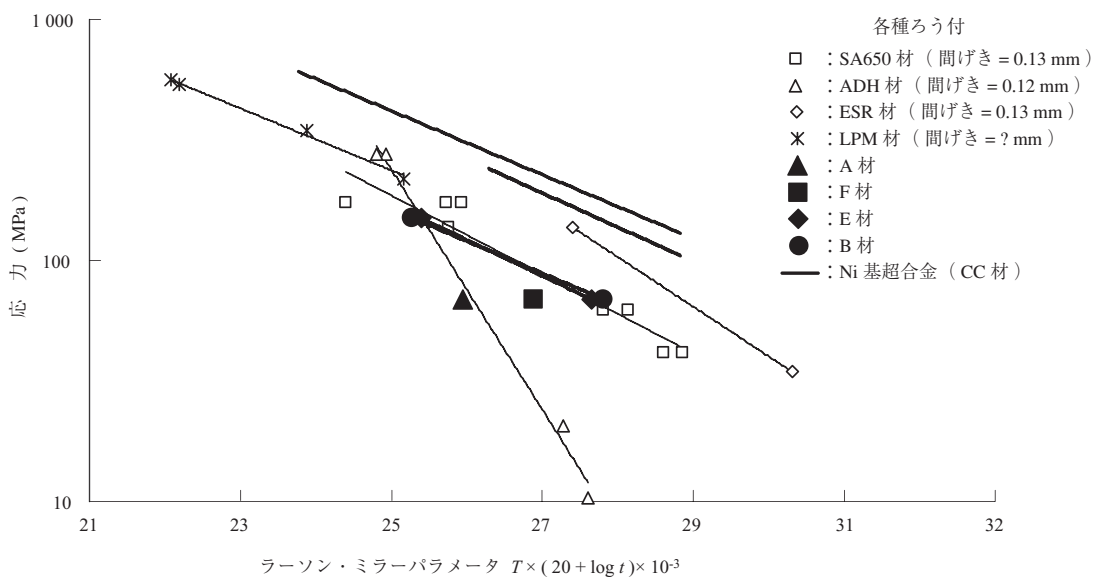


第 3 図 クリープ試験を中断した試験片のろう付部組織  
Fig. 3 Microstructures of brazed areas after creep interrupt tests

リープ損傷は認められず、主にろう付部のクリープ速度が速いことに起因する<sup>(5)</sup> ネッキングが生じ破断に至る。

一方、A 材 (第 3 図 - (b)) および F 材では、ろう付部の結晶粒界において応力軸に対して、垂直方向に多数のマイクロクラックが発生しており、懸念されたとおり Si 添加量が増加すると粒界弱화가生じ、クリープ特性が低下することが明らかとなった。

以上のクリープ試験結果をラーソン・ミラーパラメータ ( $C=20$ ) で整理し、ろう付材のクリープ特性を第 4 図に示す。また、図には各社で開発された各種のろう付修理のデータを併せて示す<sup>(2)~(4)</sup>。文献のデータは、試験雰囲気は明示されていないが、大気中であると考えられる。ここで本研究のデータは Ar 雰囲気中での試験である分、長寿命側に評価していると考えられるが、一方、本研究のろう付の間げきが  $1.0\ \text{mm}$  であるのに対し、文献では



(注) T : 温度 (K)  
t : 時間 (h)  
ESR 材 : Howmet 社 (アメリカ) が開発したろう材  
LPM 材 : Liburdi 社 (カナダ) が開発したろう材

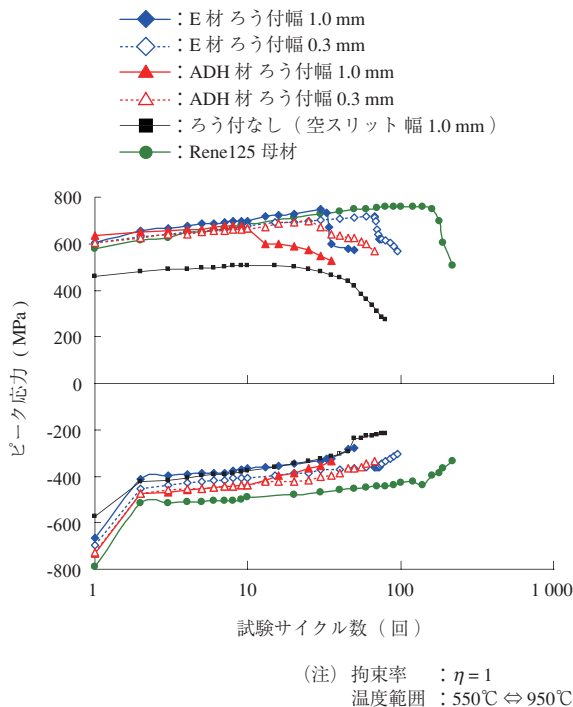
第 4 図 ろう付材のクリープ特性  
Fig. 4 Creep property of brazing repaired specimens

0.13 mm と小さい。ろう付部のクリープ特性は、その間げきが狭いほど母材からの塑性拘束を強く受け、長寿命側に評価されることが知られている<sup>(6)</sup>。

### 3.3 ろう付部の熱疲労特性

十分なクリープ特性をもち、かつ、組織の微細化によって優れた疲労特性が期待される E 材について、その熱疲労特性を評価した。E 材に加えて、① ADH 材（GE 社（アメリカ）が開発した ADH ろう付材：以下、ADH 材と呼ぶ）② Rene125 母材 ③ ろう付修理を行わない試験片（比較のため、試験片にクラックを模擬した間げきのみを加工した試験片）、について試験を実施した。試験片の間げきの幅は 0.3 mm および 1.0 mm とし、また、試験片断面積におけるろう付部の断面積の比率は 20% とした。

本試験条件では、試験片は加熱時に圧縮応力が負荷され、冷却時に最大 800 MPa 程度の引張応力が負荷されることから、ろう付を行わない Rene125 母材も百数十サイクルでクラックが発生した。第 5 図に熱疲労サイクルに伴うピーク応力の推移を示し、圧縮および引張のピーク応力の推移をサイクル数で整理した結果を示す。サイクル初期における引張ピーク応力に着目すると、いずれのろう付材においても、ほぼ母材同様の応力となる負荷が可能であったろう付修理によって、母材同等まで機能回復できたと判断



第 5 図 熱疲労サイクルに伴うピーク応力の推移  
Fig. 5 Transition of tensile and compression peak stress against thermal fatigue cycle

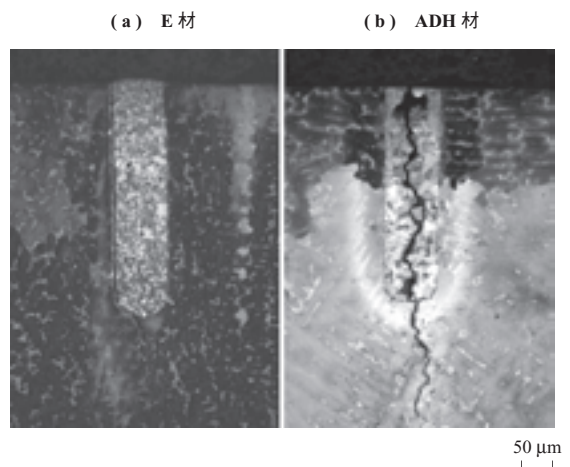
できる。

一方、ろう付を行わなかった試験片では、スリットに開口変位が生じるため、引張ピーク荷重が約 450 MPa までしか負荷されない。また、応力範囲が小さいにもかかわらず、20 サイクル程度の負荷によってスリット底部からクラックが発生した。

試験経過に伴い、ろう付部または母材にクラックが発生すると、それに対応して開口変位が生じるため、引張りおよび圧縮ピークの低下が認められた。ろう付部幅 1.0 mm で比較すると、E 材では 34 サイクル、ADH 材では 13 サイクルでクラックの発生が認められた。修理部幅を 0.3 mm にすると、いずれのろう付材でもクラックが発生するまでのサイクル数が大きくなる。E 材では 70 サイクル、ADH 材では 31 サイクルとなり、本研究で開発した E 材が熱疲労特性に優れることが確認できた。ろう付幅が小さいほどクラックの発生サイクル数が大きくなるのは、より母材からの塑性拘束効果が得られるためと考えられる。

第 6 図に熱疲労試験におけるクラック伝播経路の断面観察結果を示す。E 材（第 6 図 - (a)）はろう付部／母材界面をクラックが進展しているのに対し、ADH 材（- (b)）ではろう付部内部をクラックが進展している。また、その経路は第 7 図に矢印で示すように分散相を伝播していた。ADH 材では E 材に比べ、硬くてろい分散相がより粗大にろう付部内部に存在している。したがって、分散相内部および素地との界面でクラックまたは、はく離が発生し、これらが連結して早い段階で熱疲労クラックが発生したと考えられる。

一方、E 材では分散相をクラックが伝播するような破壊



第 6 図 熱疲労試験におけるクラック伝播経路  
Fig. 6 Crack paths of brazed area after thermal fatigue tests



第7図 分散相内部および界面に生じた熱疲労クラック  
 Fig. 7 Thermal fatigue cracks occurring inside and at interface of dispersal phase

が生じておらず、前述のようにろう付部/母材界面での破壊が生じるモードへと移行していた。熱疲労特性を向上させるために、分散相を可能な限り微細分散させる本研究の組織制御コンセプトの有効性が確かめられた。

#### 4. 結 言

ジェットエンジンのタービン部品は、主に熱疲労による損傷を受けると考えられているにもかかわらず、これまでその向上を目的としたろう付修理技術は開発されていなかった。本研究では、熱疲労特性向上を目的にろう付組織の微細化を試みた。この結果、既存のろう付技術と比べ、優れた機械的特性が得られることを確認した。

今後、試験片レベルでの寿命評価とエンジン部品としての耐久試験との相関関係の確立を図りながら、本修理技術の適用可能範囲を明確にしていく所存である。

#### 参 考 文 献

- (1) W. M. Miglietti, R. Curtis, B. Hall and C. M. Lazzarin : Liquid Phase Diffusion Bond Repair of Westinghouse 501F, Row 3 Vanes International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition 2000-GT-339 (2000) pp. 1 - 14
- (2) K. A. Ellison, P. Lowden and J. Liburdi : Powder Metallurgy Repair of Turbine Components Journal of Engineering for Gas Turbines and Power Vol. 116 (1994) pp. 237 - 242
- (3) R. D. Wustman, L. M. Hampson, J. S. Smith and M. E. Suneson : High Strength Diffusion Braze Repair for Gas Turbine Components International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition 96-GT-427 (1996) pp. 1 - 9
- (4) W. A. Demo, S. Ferrigno, D. Budinger and E. Huron : Improving Repair Quality of Turbine Nozzle Using SA650 Braze Alloy Superalloys 2000 The Minerals, Metals and Materials Society (2000) pp. 713 - 720
- (5) 大岩直貴, 錦織貞郎 : Ni基超合金ろう付け部の組織とクリープ特性 耐熱金属材料第123委員会研究報告 Vol. 47 No.1 2006年3月 pp. 53 - 60
- (6) 大岩直貴, 錦織貞郎 : 異なるろう付け間隙を有するNi基超合金拡散ろう付け部のクリープ特性 耐熱金属材料第123委員会研究報告 Vol. 48 No.1 2007年3月 pp. 57 - 64