

# 線形摩擦接合 ( LFW ) 技術の航空エンジン部品への適用研究

## Application of Linear Friction Welding Technique to Aircraft Engine Parts

黒 木 博 史 航空宇宙事業本部技術開発センターエンジン技術部 部長  
根 崎 孝 二 技術開発本部生産技術センター溶接技術部 部長  
若 林 元 航空宇宙事業本部生産センター生産企画部 主査  
中 村 賢 治 航空宇宙事業本部生産センター生産企画部 主査

航空エンジンでは、燃費向上・軽量化を目的として翼とディスクを一体化したブリスクを採用する事例が増えている。ブリスクの製造には、鍛造材から削り出す方法が使われてきたが、切粉となる素材のロスが大きい。このため線形摩擦接合 ( Linear Friction Welding : LFW ) を利用したブリスク製造方法の開発を進めている。LFW は、接合界面を往復運動でこすり合わせることによって生じる摩擦熱を利用し、溶かさずに接合する技術である。本稿では、接合による組織の変化や継手の機械的特性、実物大ブリスクの試作結果について報告する。

In recent aircraft engines, the application of blisks in fan and compressor rotors is increasing to achieve weight reduction and performance improvement. The conventional manufacturing method of blisks is to machine them from a forged material. But with this method, the loss of material is relatively large. Therefore a manufacturing method in which blades are joined to disks with linear friction welding ( LFW ) is being developed. LFW is a kind of solid state welding technique in which the weld surfaces are rubbed together and heated up. In the current study, the changes in the micro structure and structural integrity of the LFW joint, as well as the results of the manufacturing trial of the compressor blisk are reported.

### 1. 緒 言

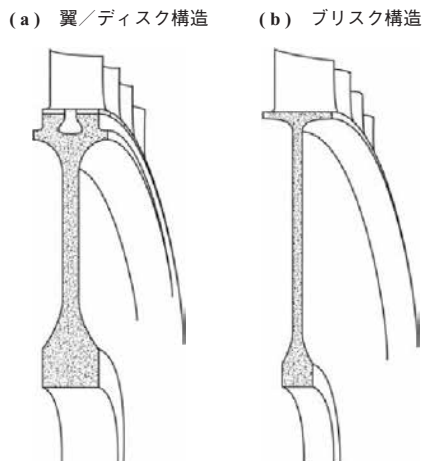
航空機のジェットエンジンでは、翼とディスクを一体化したブリスクをファンや圧縮機のロータに採用する事例が増えている。これは、翼とディスクの結合部の重量と、それを支えるためのディスクのボア部の重量削減による軽量化と、翼座と翼座の隙間からの漏れを削減することで性能向上を達成することを目的としている。従来型の翼/ディスク構造と、ブリスク構造の比較を第 1 図に示す。一般

にブリスク構造にすることで約 20%の重量軽減が可能といわれている。

ブリスクの製造には、鍛造素材から翼部を削り出す製造方法が一般的である。ファン、圧縮機のディスク、翼の素材には高価なチタン合金が使われることが多く、ブリスクを削り出して製造すると、粗加工段階の切粉として多くの素材が無駄になる。この課題を解決するため、線形摩擦接合 ( Linear Friction Welding : LFW ) 技術を利用して、ブリスクを製造する方法が考案され、戦闘機用エンジンなどで実用化されている。LFW は、別途製造した翼部品とディスクを接合することによってブリスクを製造する技術である。第 2 図に LFW によるブリスク製造の模式図を示す。

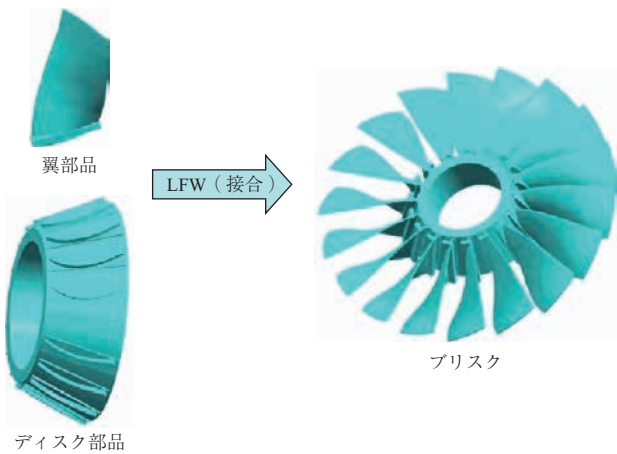
LFW は、一方の部品を他方の部品に押し付け、一方を接合面に対し水平に往復運動させることで摩擦熱を発生させ、接合を実現する技術である。第 3 図に LFW プロセスの概略図を示す。固相接合の一種であり、溶融接合に比べて、良好な継手組織が安定して得られるため、高い信頼性を求められるブリスク製造に適している。また、継手形状の自由度が高く、軸対称形状に限られる回転摩擦接合に対しても優位性をもつ。

本稿では、接合による継手の組織変化や、継手の機械的

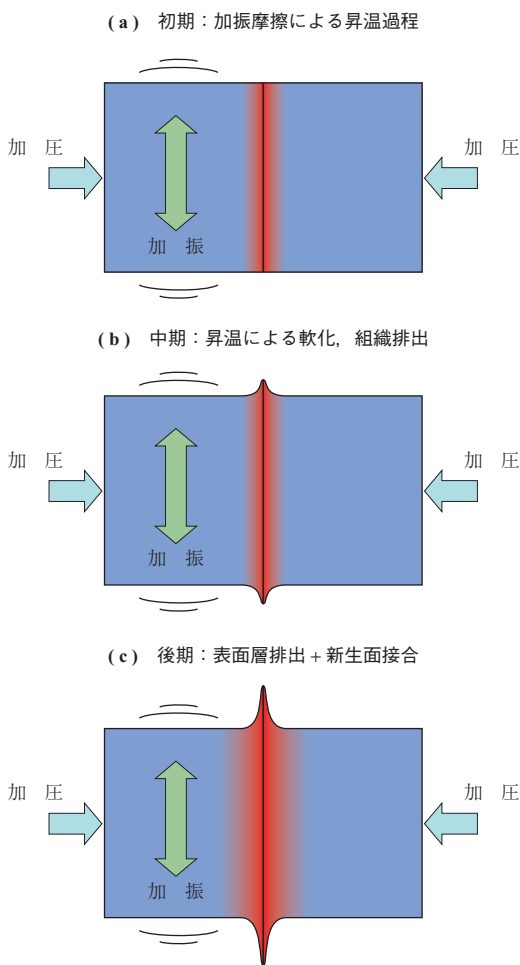


第 1 図 圧縮機ディスク構造の比較<sup>(1)</sup>

Fig. 1 Comparison of compressor disk structure<sup>(1)</sup>



第 2 図 LFW によるブリスク製造の模式図  
Fig. 2 Schematic view of blisk manufacturing by LFW



第 3 図 LFW プロセスの概略図  
Fig. 3 Schematic view of LFW process

性質について報告し、次に実物大ブリスク試作の結果について報告する。

## 2. 試験片の接合

### 2.1 試験条件

継手の組織、機械的特性を調べるため、実際の圧縮機

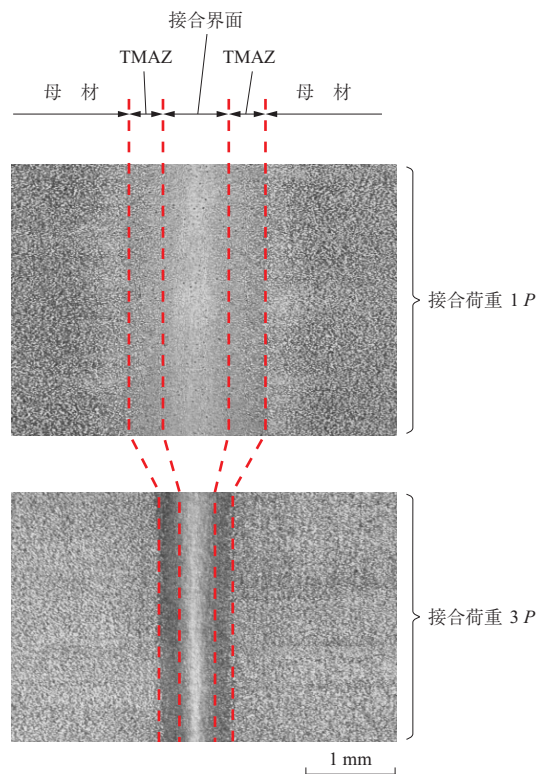
の動翼と同じ断面積をもった矩形断面の試験片で接合試験を行った。試験片の材料は、ファン、圧縮機のディスク、ブレードの材料としてよく使われる Ti-6Al-4V 合金 (AMS4928) である。

接合時の荷重を変えて影響を確認した。接合荷重については、基準となる接合荷重  $P$  に対して、その 3 倍までの荷重で接合を行い、継手部の硬さ分布、マクロ、ミクロ組織観察、引張強さ、疲労強度について調査した。

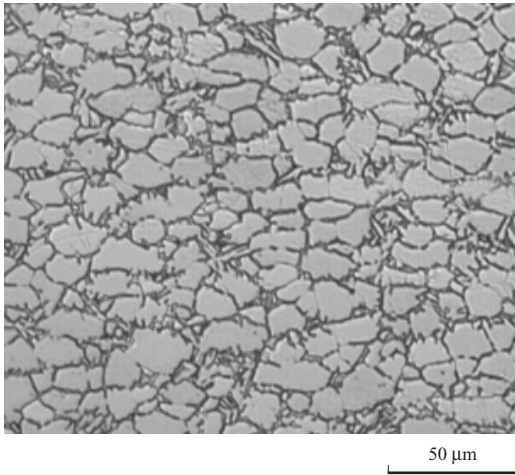
### 2.2 組織観察

LFW 継手のマクロ組織を第 4 図に示す。接合界面と塑性流動域 (Thermo-Mechanically Affected Zone : TMAZ) を合わせた幅は、接合荷重  $1P$  で 1.5 mm、接合荷重  $3P$  で 0.8 mm となって、接合荷重が低い方が若干広い。これは、接合荷重が低いと変形を開始するのに、より強度を低くする必要があるため、変形開始温度が高くなり、より高温にさらされていること、また、接合を開始するのに時間が掛かるので、摩擦熱がより拡散するためと考えられる。

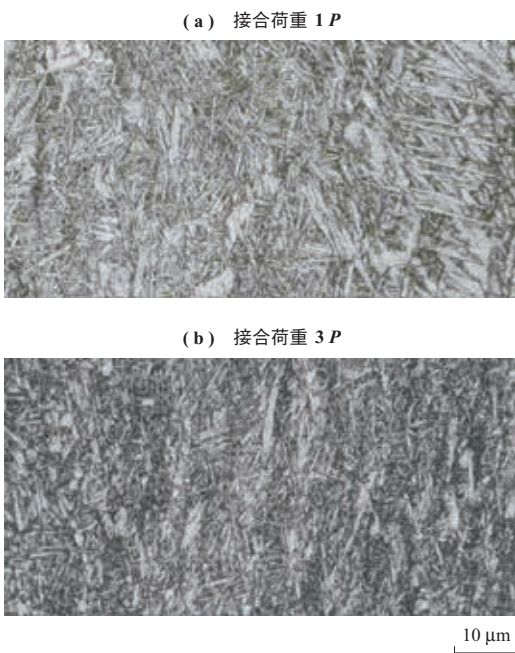
母材のミクロ組織を第 5 図に示す。Ti-6Al-4V 合金の鍛造材は、 $\alpha$  と  $\beta$  の Bimodal 組織であることはよく知られている。これに対して、接合界面のミクロ組織は第 6 図に示すように、ごく微細な針状  $\alpha$  組織の様相を示しており、接合荷重が大きいほどより細かい組織になってい



第 4 図 LFW 継手のマクロ組織  
Fig. 4 Macrostructure of LFW joints



第 5 図 母材のマイクロ組織  
Fig. 5 Microstructure of parent material



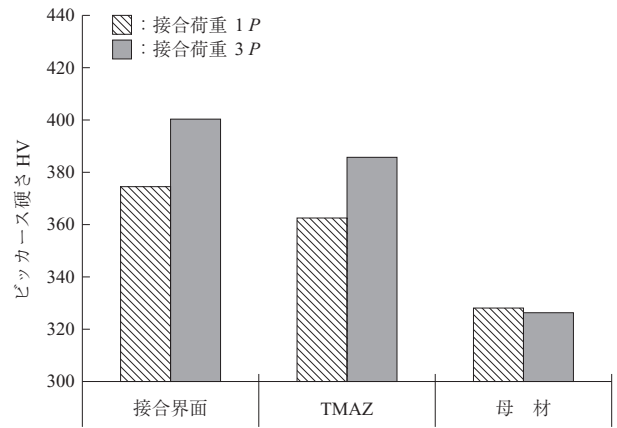
第 6 図 接合界面のマイクロ組織  
Fig. 6 Microstructure of LFW weld line

る。Ti-6Al-4V 合金は、高温で  $\beta$  変態を起こすが、継手部ではその温度を超えていることが確認できる。

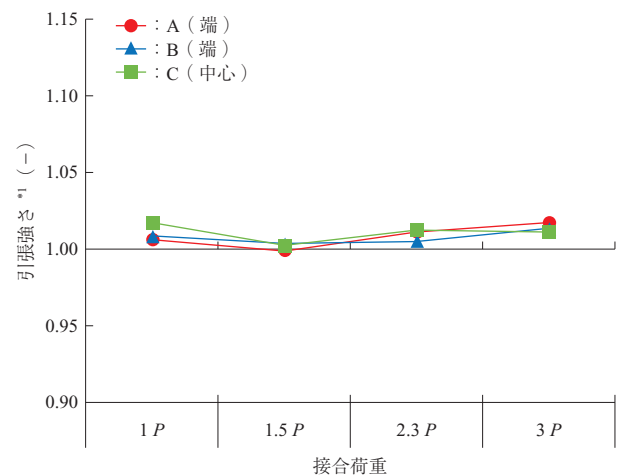
また、硬さ計測の結果を見ると、接合部は硬くなっており、組織変化も一因と考えられる。第 7 図に硬さ分布を示す。

### 2.3 強度試験

継手から試験片を切りだし、引張試験、疲労試験に供した。試験片には、残留応力除去を目的とした熱処理は行っていない。試験片の中央、端部で強度に差があるか確認した。引張試験（引張強度比較）の結果を第 8 図に示す。試験片の採取位置、接合荷重で強度に差がないことが確認できた。破断位置は継手部ではなく、母材部であり、母材



第 7 図 硬さ分布  
Fig. 7 Distribution of the hardness



第 8 図 引張強度比較  
Fig. 8 UTS of LFW joints

(注) \*1: 継手/母材強度の比を示す。

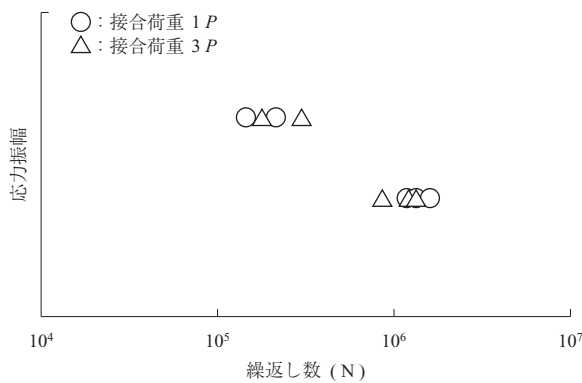
の強度を反映していると考えられる。

疲労試験（LFW 継手の疲労強度）の結果を第 9 図に示す。疲労強度は、接合荷重によって有意差がないことが確認された。しかし、ほかの研究者が指摘している影響因子もあり<sup>(2)</sup>、継手の疲労強度の評価を慎重に行った。詳細は 3.2 節で述べる。

## 3. ブリスク試作

### 3.1 寸法精度

ブリスク製造能力を実証するため、実物大の圧縮機ブリスクの試作を行った（第 10 図）。翼部品を加振し、ディスク部品を押し付けて LFW を実施した。翼部品は、加振時にしっかりと把持するため、グリップ用のフランジをもつ。接合位置は、翼根部の応力集中を避けて、翼根元 R 部から離れた位置で接合した。



第 9 図 LFW 継手の疲労強度  
Fig. 9 Fatigue strength of LFW joints



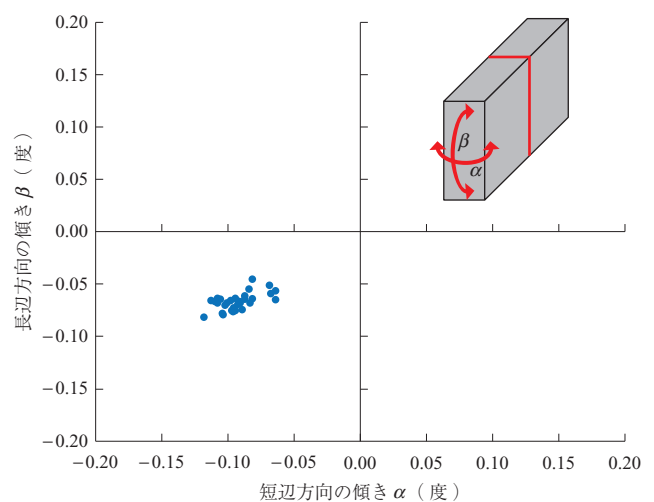
第 10 図 LFW で製造した圧縮機ブリスク<sup>(3)</sup>  
Fig. 10 Compressor blisk manufactured by LFW<sup>(3)</sup>

接合完了後に、翼先端の位置を三次元計測器で計測し寸法精度を確認した。翼の傾きに換算すると、そのばらつきは長手方向に 0.04 度程度であった。これは 100 mm の高さの翼を接合した場合、0.07 mm のずれに相当し、公差幅に対して十分に小さく、工程能力は十分であることが分かった。第 11 図に LFW 継手の傾きのばらつき計測結果を示す。

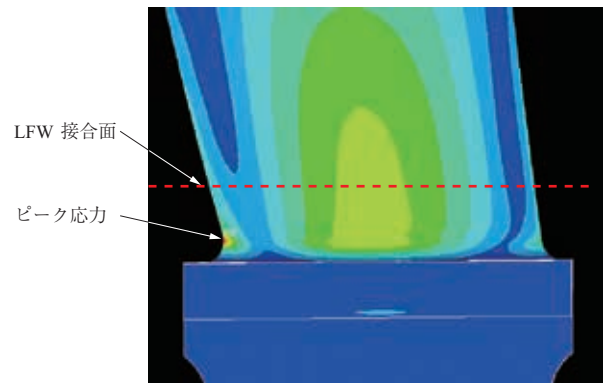
### 3.2 実翼高サイクル疲労試験

圧縮機の翼にとって、主要な破壊モードは高サイクル疲労 (High Cycle Fatigue : HCF) である。LFW で接合された翼が、実機に必要な HCF 強度を発現するか確認するため、実翼の加振試験を実施した。

最も基本的な 1 次の曲げモードにおいて、振動応力のピークは翼根元 R 部に発生するため、そのピーク応力を避けて接合位置を設定した。事前のひずみ分布計測によると、ひずみ分布は FEM ( Finite Element Method ) 解析の予測と良く一致しており、接合によって振動特性に変化が生じていないことが分かる。第 12 図に HCF 試験片の振動応力分布を示す。試験の結果、LFW で接合された翼が



第 11 図 LFW 継手の傾きのばらつき計測結果  
Fig. 11 Measurement of variation of LFW joint inclination



第 12 図 HCF 試験片の振動応力分布  
Fig. 12 Vibratory stress distribution of HCF test specimen

実機に必要な HCF 強度を発現することを確認できた。

## 4. 結 言

ジェットエンジンのファン、圧縮機に広く使われる Ti-6Al-4V 合金の LFW 継手の組織、機械的特性について調査した。接合界面の組織は針状  $\alpha$  が主体で、母材より若干硬く、引張強度は母材と同等以上である。接合荷重を 1 ~ 3 P の間で幅広く振っても、継手強度に大きな影響はなく、LFW は施工条件範囲が広く、優れた製造技術であることが分かった。ブリスクの要素技術として、翼部品を中空化したり、ディスクと翼にそれぞれ適した材料を使用したりすることで、さらなる軽量化を実現できる可能性があり、ますます発展していくことが期待される。

今後もさらに軽量化を図るため、実用化研究に取り組んでいく。

— 謝 辞 —

本研究の一部は、経済産業省の航空機・宇宙産業イノベーションプログラム／エネルギーイノベーションプログラムによる「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から助成を受けて実施したものである。

参 考 文 献

(1) R. Turner, J. -C. Gebelin, R. M. Ward and R. C.

Reed : Linear friction welding of Ti-6Al-4V Modelling and validation Original Research Article Acta Materialia Vol. 59 ( 2011. 6 ) pp. 3 792 - 3 803

(2) Mark R. Daymond and Neil W. Bonner : Measurement of strain in a titanium linear friction weld by neutron diffraction Original Research Article Physica B Vol. 325 ( 2003. 1 ) pp. 130 - 137

(3) 加藤 大, 後藤信也, 加藤崇也, 若林 元, 落合宏行 : シンプル・高性能化技術 ( 圧縮機 ) IHI 技報 第 47 卷 第 3 号 2007 年 9 月 pp. 102 - 108