

## 航空・宇宙「プロセス・施工編」\*



田村 純一\*\*

Aviation and Space (Process &amp; Construction)\*

by TAMURA Junichi\*\*

**キーワード** 航空機, 構造組立, ファスナ, リベット, ボルト

### 1. はじめに

航空機機体構造の代表的な材料は、アルミ合金（ここでは2000系や7000系のいわゆるジュラルミンを指す）や炭素繊維複合材など、溶接性に難がある材料やそもそも溶接出来ない材料で構成されている。また、長期間の運用を考慮するため、高い疲労強度や検査・修理性に優れた接合法が必要である。このような背景から、機体構造の接合にはリベットやボルトナット（これらを総称してファスナという）による機械的な締結が主流であり、溶接はファスナ接合できない部位や極めて特殊なケース以外は用いられない。船舶や建築物など多くに業界で構造接合の主流はファスナから溶接に移行してきたが航空機構造は例外であり、21世紀の現在までファスナ接合を発展させてきた。

このような背景から、航空機機体構造の組立法としてのファスナ接合のプロセスを紹介し、溶接以外の接合法の理解を深めて頂けたらと思う。

### 2. 製品と工作法

大型の航空機では図1のように胴体、翼などをいくつかの単位に分割してサブ組立を行い、これを結合して機体構造を完成させる。分割の単位は構造設計、製造性、輸送性を考慮して決定され、サブ組立とその上位組立の寸法の整合性（上位組立で精度良く組付けが可能か）を確保するように組立治具や工程を設計する。航空機の組立技術は、このようなマクロな意味の組立技術とリベット接合に代表されるミクロな組立技術があり、本紙では後者の概要を説明する。

航空機では構造の信頼性や軽量化のために、ほとんど全

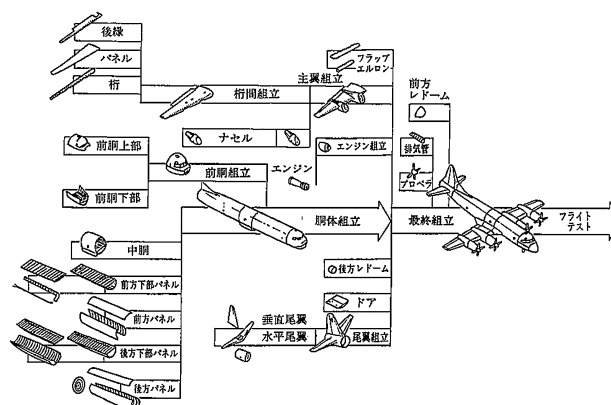
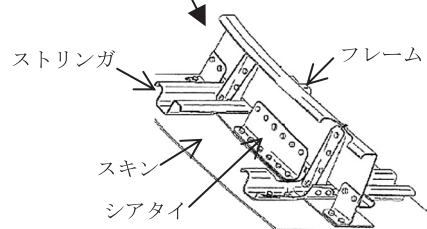
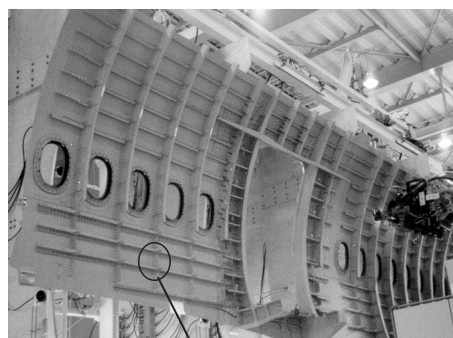
図1 航空機の組立工程図<sup>1)</sup>

図2 胴体の構造

\*原稿受付 平成25年12月26日

\*\* 川崎重工株式会社 航空宇宙カンパニー KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES, LTD. Aerospace Company

ての継手が重ね継手であり、作業性が悪く自動化が困難な形状が多い。また、荷重を確実に伝えるためにファスナの嵌め合いの管理（リベットは自ら膨らみ勘合する）が重要であり、後述のように部品を通し孔加工することが必要である。このような構造様式や要求事項が航空機の接合技術の特徴付けていると言える。

代表的な胴体構造を図2に示す。胴体構造はスキン、ストリング、シアタイ、フレームなどの部品で構成され、ドアや窓などの切り欠き部には必要により補強の部材が配される。

これらの部品をファスナにより接合するために以下のような手順で組立を行う。作業には多くの手順と細心の注意が必要であり、これを膨大な数の接合点全てに施工しなければならない。

**2.1 部品の位置決め**

多数の部品を正しい位置にセットするために組立治具を用いる（図3）。

航空機部品は軽量化のために極めて薄く設計されており、部品単体やサブ組立段階（完成して断面が閉じるまで）では自ら形状を保つことが困難である。そのため、組立治具設計や工程計画ではこれを考慮することが重要である。組立治具は部品位置決め機能の他に、組立品の形状を保つ機能や上位組立とのインターフェースを保証する機能が必要とするため、複雑かつ高価なものとなる。

部品の位置精度は一般に±1.0mm以下であるが、接合時の部品間の隙間は0.1mm以下が要求される。隙間が大きい場合はシム調整を行う。これは、無理な接合による応力付与を防止するための設計要求であるとともに、組立ひずみを極小化して構造精度を確保する工作的な目的でもある。組立治具は、製品の大きさ（図2の製品では長さ10m近くなる）に比して、このような精度を確保するため極めて精密に製作される。

**2.2 孔あけ**

接合に使用するファスナに合わせた孔加工を行う（図1の製品では1万箇所以上の孔加工が必要）。孔加工は治具により位置決めされた部品に対して通し孔とすることが基本である。個々の部品で孔をあけないのは、部品公差に起因した孔ズレによる接合強度低下や組立歪を防止するためである。孔の加工公差はリベットの場合0.006in（0.152mm）、後述するハイロックやボルトの場合0.003in（0.076mm）である。なお、孔やファスナの寸法規格はインチ系で定義される。

**2.3 分解・バリ取り・合わせ面シーリング・再組立**

孔加工後、そのままリベットを打鋸することは原則として許されない。孔加工により発生するバリや切屑の残留は接合強度の低下を招く。従って、孔加工を終えた部品は一度取り外して孔まわりのバリ除去と残留している切屑や切削剤などを清掃する。その後、部品合わせ面の防食のためシーラントを塗布し再組立を行う。

**2.4 接合**

再組立した部品は合わせ面シールの硬化前に接合を行う。接合に使用するファスナの例を表1に示す。

一般的にはアルミ合金製のリベットが用いられ、強度が必要な部位に関してはハイロックファスナ（Hi-Lok：Hi-

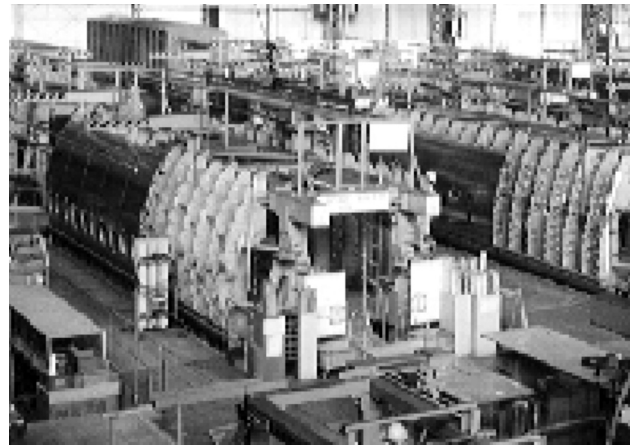
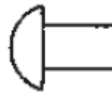

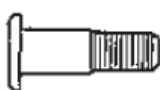

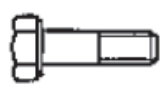
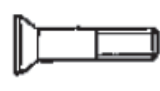
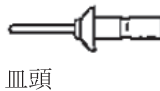





図3 組立治具の例<sup>9)</sup>

表1 ファスナの種類

ファスナ種		主な材料	特徴等
普通リベット	丸頭  皿頭 	A2117 A2017 A2024 等	2024 リベットは熱処理を行い、時効硬化前に打鋸を完了する。
ハイロック	平頭  皿頭 	合金鋼 チタン合金 等	六角頭部がねじ切れることでトルク管理が可能。高応力部に広く使用される。
ボルト	角頭  皿頭 	合金鋼 耐食鋼 チタン合金 等	大径や着脱が要求される部位に使用される。トルク管理が必要。
ブラインドリベット	丸頭  皿頭 	A2017 等	ステムを引抜くことで締結する。一方向からのかしめ作業が可能。
ブラインドボルト	平頭  皿頭 	合金鋼 耐食鋼 等	ネジ付ステムを回転させナットに相当する材料を潰して締結。一方向からの作業が可能。

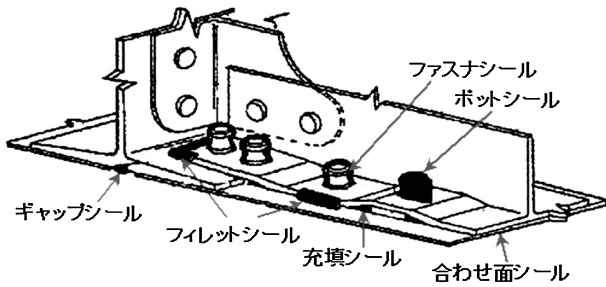


図4 シーリング施工部位

Shear 社の登録商標であり、以下ハイロックと略称する)と呼ばれる航空機専用のボルトを用いる。機体外表面に装着するファスナは皿頭形状を使用し、気流面の凹凸が極小となるように施工しなければならない。

また、構造的に内面から接合作業が出来ない部位については、ブラインドリベットやブラインドボルトなどの一方から締結可能なファスナを使用することもある。

2.5 シーリング

接合された部位に対して防食用のシーラントを施工する。施工例を図4に示す。機体構造はキャビンの湿度などにより想像以上の結露に曝されるため、入念な防食対策が必要である。

3. 接合プロセスおよび施工

ファスナ接合の代表的な工程である孔あけと締結に関するプロセスと施工法について述べる。手作業による施工が一般的であるが、自動化が可能な部位についてはオートリベッタという専用機で施工するので、そのプロセスについても説明する。

3.1 孔あけ

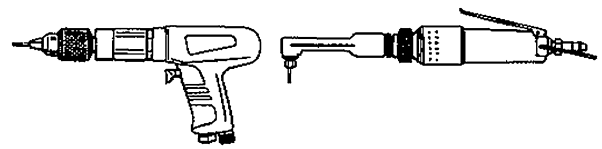
孔加工にはドリルを用いるが、部位によっては精密孔が要求されるためリーマ加工を併用する場合もある。製品が大きく複雑であるため、様々な種類のエアツールを使い、手作業で孔加工を行っていく。図5にエアツールの例を示す。機内の狭く複雑な部位の孔あけにはアングルタイプの工具を使用する。組立工程が進み、構造が完成に近づくに従って孔あけ作業は困難になり、人の技量に頼った作業になっていく。

3.1.1 アルミ合金に対するドリル

加工技術的には市販のドリルが使用可能である。しかしながら、径がインチ系であるとともに、ファスナ種類や図面要求により最適な径は千差万別なので結局は専用設計となってしまう、調達や管理に手間がかかる。図6に孔加工に対する規格例を示す。

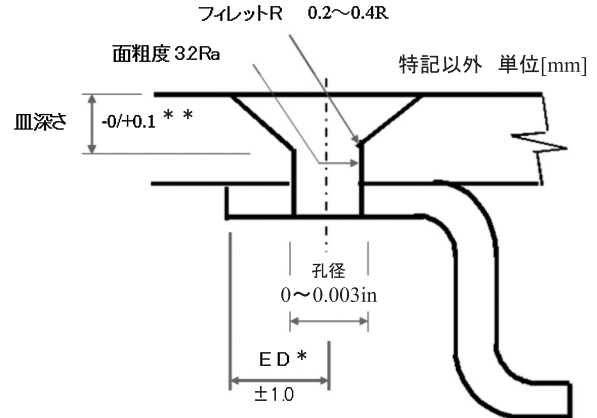
機体上におけるドリル作業は、手作業で十分に力を掛けられないこと、さらに製品が薄くたわみ易いため、1/4 in (6.35 mm) 程度の孔あけであっても、下孔をあけてから正寸に仕上げる工程をとる。加工条件的には、同様の理由で使用するドリルの最適切削送りよりも遅い送りとなってしまう。

また、潤滑剤の適用は認められているが、作業後に機体を清掃するという困難さ考えると、その使用は最小限とし



ピストルタイプ アングルタイプ

図5 ドリル作業に使用する工具<sup>1)</sup>



\* 孔位置を定義する寸法 (Edge Distance)

\*\* 接合後のファスナ頭の凹凸

図6 孔加工に関する公差例 (皿頭ハイロック)

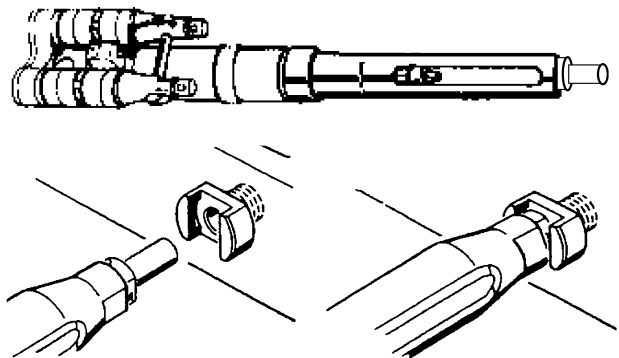


図7 パワーフィードモータと固定方法

なければならない。潤滑不足かつ手作業という悪条件となるので、作業者にはある程度の技量が必要である。加工反力が大きい大径孔に関してはパワーフィードモータ (図7) を使用する。

パワーフィードモータは、ドリルの回転の他に送りの機能を持った工具であり、ドリル回転用のエアモータに送り用のボールネジを接続した構造となっており、決まった送り量でドリル加工することが可能である。また、使用するテンプレート (機体に装着して孔位置や角度を示すガイド治具) は、当モータを固定して切削反力を受け持つように設計する。これにより、作業者はテンプレートに当モータをセットするだけで自動加工を行うことができる。

3.1.2 炭素繊維複合材に対するドリル

近年、使用量が増加してきた炭素繊維複合材などの材料

に対しては、超硬合金またはダイヤモンドコーティングのドリルを使用してドリル寿命を確保する。加工時の主な不具合は層間剥離や繊維切残し等が挙げられる。これを解決するため多種多様なドリル形状が考案されており部位や作業内容に合わせて専用化して使用されている。

また、複合材部品に金属製の部材を取付けることもあり、特にチタン合金製の部品が多く使われるようになっており、炭素繊維複合材とチタン合金に通し孔をあけるという難易度が高い工程が増加している。加工中に発生するチタン合金の切屑が炭素繊維複合材の孔内面を削ってしまい孔径拡大や層間剥離を発生させることが知られており、解決が求められている分野となっている。

### 3.2 接合

#### 3.2.1 リベットの接合プロセス

リベット（図8）のかしめには、エアハンマによる方法とスクウィーザによる方法があり（図9），作業性やリベッ

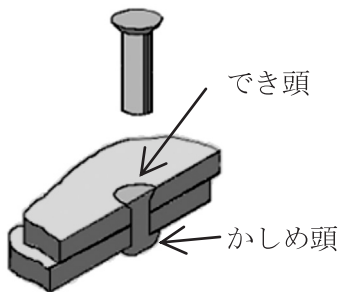


図8 リベット（皿頭）

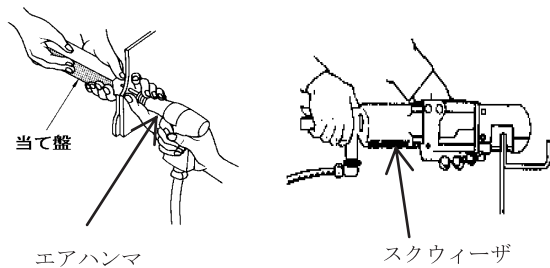
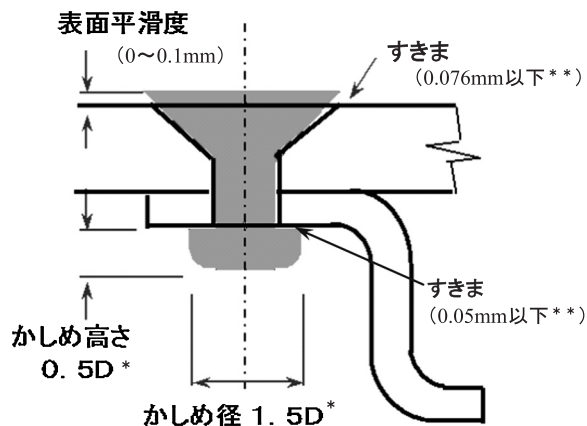


図9 リベットのかしめ工具例



\* D：リベットの呼び径  
 \*\*シャンクに到達しないこと

図10 リベットのかしめに関する規格例

トのサイズなどによって使い分ける。

エアハンマによるかしめ作業は、ハンマ担当者と当て盤担当者の協調作業であり、でき頭をハンマリングし、かしめ頭側を当て盤で抑えてかしめていく。製品が大きいため二者は顔が見えない状態で作業することになるが、絶妙な声かけと呼吸を合わせた手際よい作業に感心させられる。

スクウィーザによる方法は図9のようなオープンスペース部に使用可能である。一人作業で出来ることや、エアハンマによる振動が無いため出来るだけこちらを使用するが、重量があるため受台やバラサで作業者の疲労軽減を工夫する必要がある。

かしめ後のリベット形状を図10に示す。航空機の部品は薄く歪やすいので、どこから打鉄するか、あるいは最低限の打撃でかしめる等、技量が求められる作業である。

#### 3.2.2 ハイロックの接合プロセス

ハイロック（図11）は高応力部に広く使われるファスナで、ピン（ボルトに相当）とカラー（ナットに相当）で構成される。ピン先端には六角孔が設けられている。これにレンチを挿してまわり回り止めとし、カラーを回転させて締結するため、一方向からの締結作業が可能である。また、

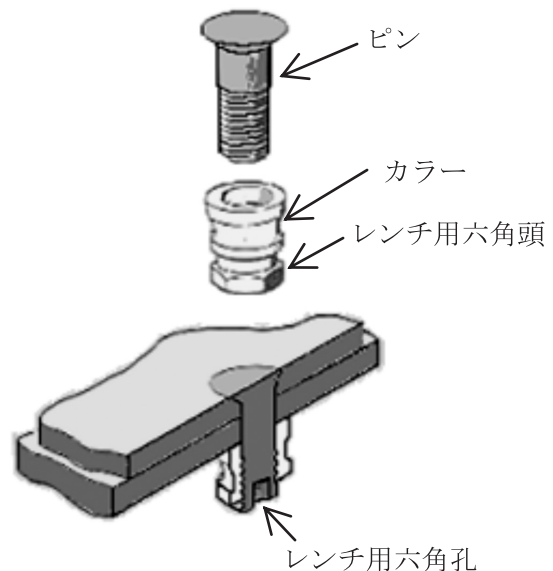


図11 ハイロック（皿頭）

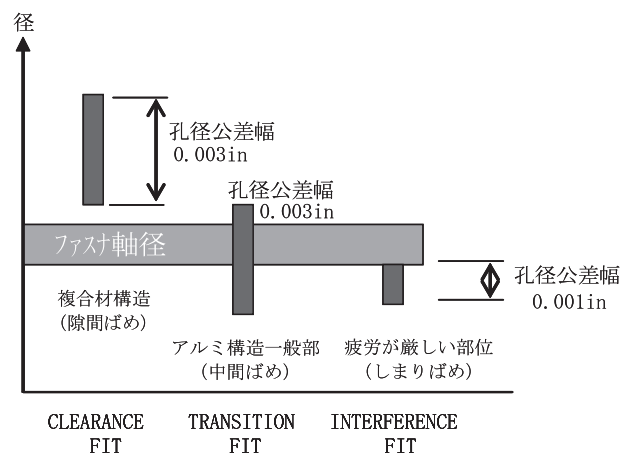


図12 ハイロック取付時の嵌め合い

カラーにレンチを装着する六角頭部は、所定のトルクになると切断するようになっており、自動的にトルク保証がなされる。

アルミ合金構造に使用する場合は中間ばめ程度の嵌め合い (Transition Fit) で使用し、複合材構造などは母材が割れないように微小な隙間ばめ (Clearance Fit) で使用する (図12)。

### 3.2.3 ボルト・ナットの接合プロセス

整備などで緩みの点検が必要な重要接合部や着脱が必要な部品の接合にはボルト・ナットを用いる (図13)。施工

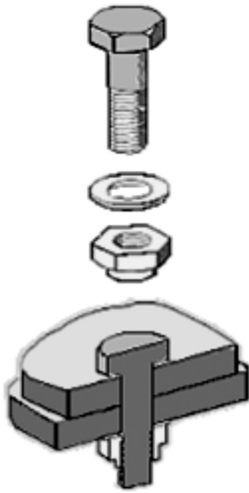


図13 ボルト・ナット

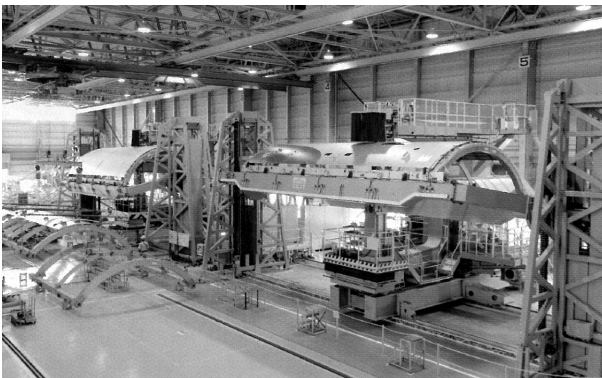


図14 オートリベッタ

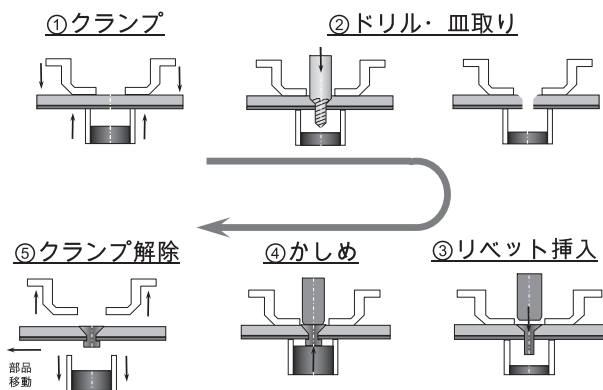


図15 オートリベッタの動作<sup>2)</sup>

プロセス自体は一般的なものと同等であるが、トルクマークの付与や、重要な部位には緩み防止のためのコッターピンあるいはセーフティワイヤが適用される。

### 3.2.4 自動機による接合プロセス

これまで述べたプロセスは手作業による接合であるが、多くの機数を製造する民間機ではオートリベッタと言われる専用機を用いて接合作業の自動化が図られる (図14)。

オートリベッタは図15に示す一連の工程を自動で行うために、製品を挟み込むクランプ機能、ドリル機能、リベット供給・挿入機能、リベットかしめ機能などを有する。接合自体はファスナ径 1/4 in (6.35 mm) 程度の施工であるが製品が大型である場合は、図14のような巨大な構造となる。オートリベッティングプロセスでは、前述のような孔あけ後の分解・バリ取り作業が出来ないことからドリル加工品質 (特にバリや孔内面粗度) の確保が特に重要視される。また、機体外表面には皿頭リベットが適用されるが、空力的要求は打鉄後のリベット頭の飛び出し (表面平滑度) は 0.1 mm 以下である。これを確保するためのドリル送り制御やかしめ条件設定が求められ、極めて複雑かつ高価な専用設備となっている。

## 4. 検査・品質管理

プロセスの各段階で品質確認のための検査を行う。ここでは、孔あけと接合に関する検査とオートリベッティングプロセスにおける品質管理について説明する。

### 4.1 孔あけに関する検査・品質管理

リベット用の孔は公差が比較的緩く、適切な工具を使えば実現できる精度であるため、通常はサンプリングで孔検査を行う。ハイロックやボルトの場合は公差が厳しいため、全数検査が基本である。検査方法は、プラグゲージ (Go-No Go ゲージ) を用いた判定で行う。

### 4.2 接合に関する検査・品質管理

#### 4.2.1 リベット接合の検査・品質管理

リベットのかしめ状態を検査する。全数検査が基本である。かしめ頭の変形やクラックを目視確認するとともに、その寸法をチェックゲージを用いて合否判定する。さらに、首下の隙間などは隙間ゲージにより検査を行う。また、リベッティング作業による母材の変形や歪による発生する部品間の隙間 (リベット間の口開き) にも許容値があり、その検査も行う。

#### 4.2.2 ハイロックやボルト接合の検査・品質管理

締結状態の確認は、ハイロックの場合、カラーからのピン突出量をチェックゲージで確認する。ボルト・ナットの場合は、検査員がトルクレンチでトルクチェックを行い、トルクマークを付与する。その他、首下隙間や母材の状態の検査はリベットと同様である。

#### 4.2.3 オートリベッティングプロセスの品質管理

オートリベッティングプロセスは、設備や工程の認定と日々のテストクーボン検査により品質管理がなされる。

設備認定では、その設備が要求品質を実現するための機能や精度を有しているかを検査するとともに、性能を維持するための点検手順とその実施も含まれる。工程認定は、使用するドリルの形状、切削条件、ドリル寿命の他に、か

しめツールの形状やかしめ条件など、品質に影響を与える工具や加工条件を認定するものである。これらは、設備導入時に試験を行い要求品質を満たすことを証明したものであり、以降、改善のために工具や加工条件を変更する場合は試験を行い再認定を受けなければならない。

また、日々の品質管理はテストクーポンを製作して、これを検査することにより行われる。テストクーポンは、一日の作業開始時と作業終了時およびドリル交換時に実施し、テストクーポン製作間に施工した機体の接合品質を保証している。

## 5. おわりに

以上のように接合と言っても、リベットかしの前後工程（位置決め、孔あけ、シーリング）の方に多くの手間を割いて施工しており、ファスナ接合とは前後工程を含めた

技術の集大成であると言える。溶接と比べれば遥かに高コストであり、部品の機械加工や複合材による一体大型化で接合点数を減らす取り組みが行われているが、現状でもリベットに替わる優れた継手は発明されていない。一部ではレーザー溶接やFSW（Friction Stir Welding：摩擦攪拌接合）を適用した機体が現れてきているが、まだ限定的であり、今後もファスナ接合が相変わらず主流を占めていくことになると思われる。

最後に参考にさせて頂いた文献の著者の皆様にお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 航空宇宙工学便覧，日本航空宇宙学会，(1992) 257.
- 2) 田村，天田，深川，生産技術の将来動向-組立技術，航空技術 No.547 (2000)，23.