

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Machining

Vol. **15**B4
Feb/2008

マシニング事業

マテリアル

■ 新商品・適用事例紹介

航空機用エンジンのブローチ加工
「クリスマスブローチ加工」

Broaching for Aircraft Engine
"Fir Tree Broaching"

〈キーワード〉 航空機・ジェットエンジン・ブローチ加工・耐熱合金
クリスマスブローチ・摩耗

機械工具事業部／工具製造事業部／ブローチ部

野田 哲夫

Tetsuo Noda



要 旨

航空機用ジェットエンジン内部でブレード(羽根)^{※1}を
 勘合させるとり付け溝の加工にはクリスマスブローチ
 加工が不可欠の工程である。

クリスマスブローチ加工に要求される形状は、安
 全上非常に高い仕上げ精度が要求されるうえ、さら
 に加工ワークは、Ni基合金を代表とする難削材の
 耐熱合金であり、形状精度を満たすだけでなく、ブロー
 チ加工表面の状態が重要な品質項目である。

加工特性を考慮した最適な刀具設計、加工条件
 の設定により、さらに高精度、高能率加工の要求に
 応えていく。

Abstract

Broaching with X-mas Tree Form Broach is indis-
 pensible in the machining of installation grooves
 for engagement of blades inside the aircraft en-
 gine. High precision is required for finishing the
 forms of the grooves with X-mas Tree Form
 Broach because of safety. In addition, the mater-
 ial of the engine is a heat-resistant Ni-base alloy
 that is very difficult to cut. Therefore, it is crucial
 to satisfy the form precision and the superb sur-
 face finish in broaching.

X-mas Tree Form Broach satisfies the broaching
 requirements of high precision and high efficien-
 cy with the optimal blade design and broaching
 conditions specific to the broaching characteris-
 tics.

1. 航空機用エンジンの ブローチ加工

航空機用エンジンの製造における重要工程の一
 つとしてブローチ加工がある。

航空機用ジェットエンジンは、図1に示すように、一
 基のエンジンに吸気、圧縮を行なうコンプレッサーディ
 スク、燃焼ガスをコンプレッサーの駆動力に変換するター
 ビンディスクをそれぞれ複数枚備えている。

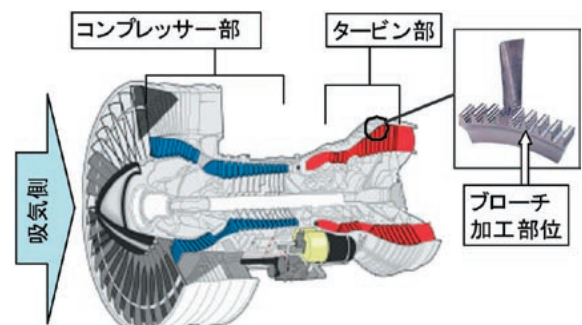


図1 ジェットエンジン

さらにこれらを分類すると、吸気側から低圧 (LPC)、
 および高圧 (HPC) コンプレッサー、続いてタービンも
 高圧 (HPT)、低圧 (LPT) タービンに分けられる。

これらのディスクとブレード(羽根)を勘合させる取
 り付け溝は、図2のようにそれぞれ特徴を持った形
 状をしており、コンプレッサーディスクには、^{※2}ダブテール
 (鳩の尾) 形状を加工するダブテールブローチ、ター
 ビンディスクには、高温高圧下での応力分散に優れ
 たクリスマスツリー形状を加工するクリスマスブローチ
 が用いられている。ブローチ加工により、これらの溝
 形状を一枚のディスク全周に亘り数十ヶ所成形する。

NACHIは、ブローチ盤、ブローチによる機械と工
 具のセットにてこのジェットエンジンの心臓部の加工
 をサポートしている。

2. クリスマスブローチとその切削方式

1) クリスマスブローチの構成

ここに示したクリスマスおよびダブルテール形状の溝を加工するためには、加工部位ごとに形状の異なる十数本のブローチを一組として加工する。クリスマスブローチの切削方式の例を図3に示す。

この例での加工は、①～②番ブローチの溝入れに始まり、⑩⑪番にてフォームの粗取り加工、⑫番にてハカマ部仕上げ、⑬番にてフォーム部仕上げ、⑭番にて溝底を仕上げる事で一溝の加工が完了する。

クリスマスブローチの設計に際しては、ワーク材質、切削長、形状などから最適な刃溝ピッチ、切り込み量を決め、さらに使用するブローチ盤の引き抜き荷重、ストローク、ホルダー列数などの設備条件を満たすブローチ形状、長さを検討し、最終的な配列が決定される。フォーム部仕上げ用ブローチ⑬番の参考例を図4に示す。

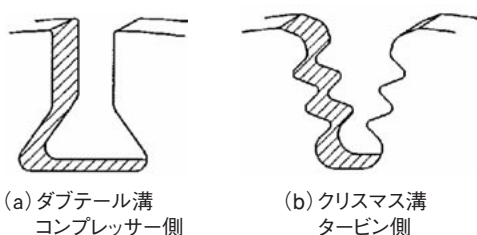


図2 ダブルテール溝とクリスマス溝

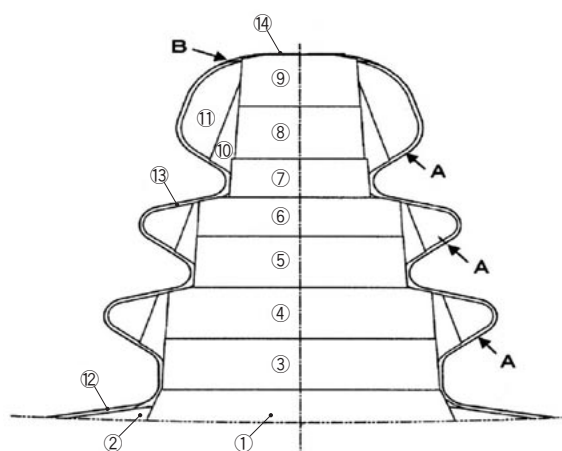


図3 クリスマスブローチ切削方式図

2) 形状精度

このクリスマスブローチ加工に要求される形状は、安全上非常に高い仕上げ精度が要求されている。図3にてAで示す部位(以下圧力面と呼ぶ)は、ディスクが回転する際、ブレードの遠心力を受ける面であり、溝形状の中で一番重要な部分である。この圧力面の製品公差レンジは、通常十数 μm であり、ブローチ加工時には $5\mu\text{m}$ 程度のレンジしか許されない。また、同Bに示すブローチ同士のつなぎ部での段差(ミスマッチ)はなく、スムーズな形状を保証しなければならない。

この総合形状精度を保証するため、ディスクと同材料のテストピースを専用ブローチ盤にて試加工し(図5)、加工形状、工具精度の保証を行なう。



図4 クリスマスブローチ(仕上げ用)

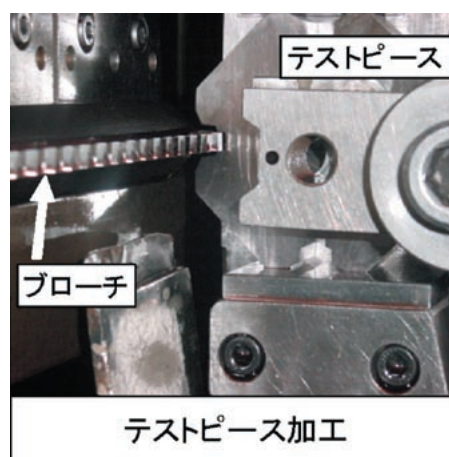


図5 テストピース加工

3) 被削材

航空機用エンジンに使用されるディスクの材質はNi基合金Inconel718を代表とする耐熱合金である。

硫黄快削鋼を100とした各種材料の切削性を、図6に示す。

ブローチ材質には耐摩耗性に優れた高級粉末ハイスを用い加工するが、再研削あたりのディスク加工数は数枚程度で、一般的な鉄系材料に比べ切削性は悪く加工は困難を極める。

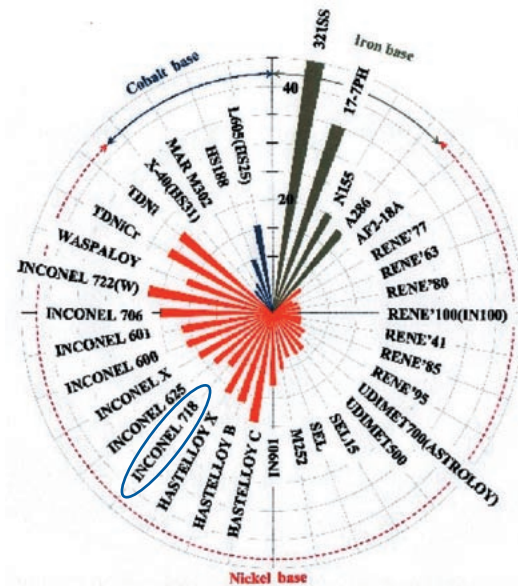


図6 耐熱合金の被削性

3. ブローチ摩耗と加工面状態

航空機エンジン用ワーク加工においては、形状精度を満たすだけでなく、その表面状態が重要な品質項目である。加工面の粗さ、ムシレなどのサーフェステクスチャ (Surface Texture)、表層部の変質層、塑性変形等のサーフェス インテグリティ (Surface Integrity) が工具寿命判定のポイントである。

工具刃先の摩耗は、表面状態に大きな影響を与えるInconel706を切削速度7m/min、切込み60 μ m、

切削長5mと35mとし、加工後のワーク表面から深さ方向の硬さを比較したグラフを、図7に示す。切削面は表面から0.1mmまで硬度の上昇が見られる。また35m加工後では、硬度がより大きく上昇している。これはブローチ加工表面 (図8) における結晶粒の変質に伴い、表面硬度の上昇を起こしていることを示している。

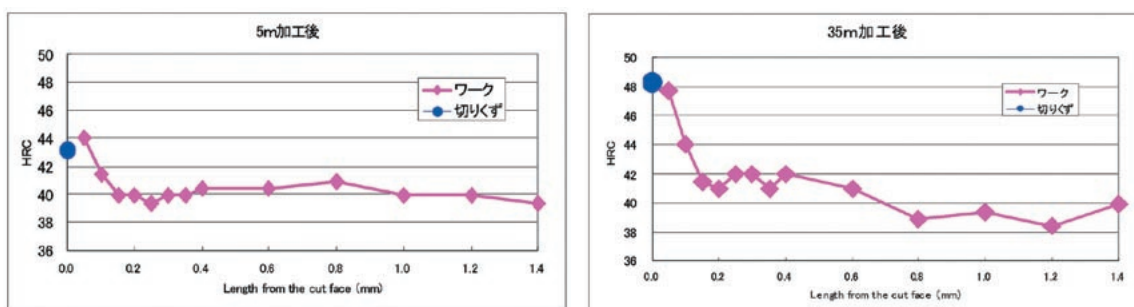


図7 表面硬さ比較

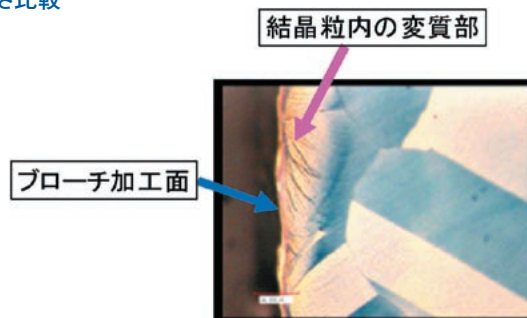


図8 ブローチ加工面 (組織写真)

4. 切りくず処理とブローチ形状

1) 切りくず処理

工具刃先の摩耗は、切りくずの形状にも影響を与える。Inconel718の新品時と5m切削後の切りくず形状を、図9に示す。刃先が摩耗した状態の切りくずはカールせず、このような切りくずは刃溝ポケットに突っ張るように張付き(図10)、ブラシでは容易に除去できなくなるため注意が必要となる。

2) 切りくずの分断

クリスマスブローチの仕上げフォームは複雑であり、これを図11(a)のようにそのままの形状で切削すると、幅の広い総形の切りくずが発生する。このような切りくずは刃溝ポケット内でカールせず、加工面がむしれたり、切りくず詰まりの原因となる。よって仕上げブローチにおいては、図11(b)のようなジグザグ切削と呼ばれる切削方式をとっている。

この方式では、仕上げ形状の歯形と、それと異なる形状の粗歯形を組み合わせて、ブローチ切れ刃を構成する。切削中、切りくずは図11(b)に示すように分断され、良好な切りくず排出性が得られる。

3) ブローチ最適形状

ブローチ設計時、図12に示すような応力解析等を行ない、信頼性の高い工具の設計、作り込みを行っている。

図12A部に示すブローチ刃溝頂部は、切削負荷による応力集中が起きやすく、強度不足によるブローチ破損を引き起こす可能性の高い部分である。

このように刃溝深さ、及び刃溝により形成されるエッジの設計を最適化し、応力集中の回避を図ることで、新品時はもちろん再研削時でも使い勝手の良い工具となっている。

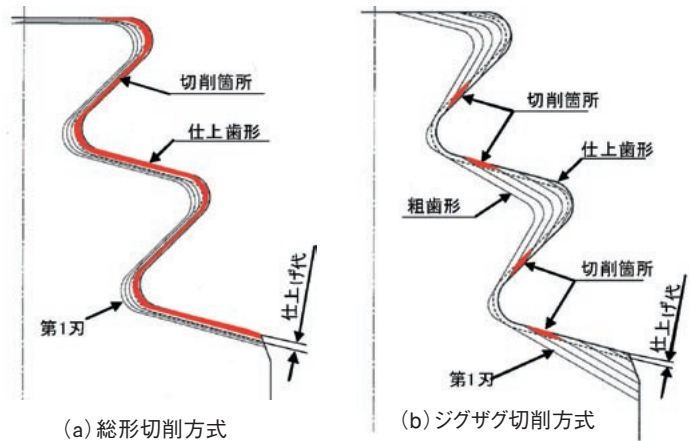


図11 ジグザグ切削方式

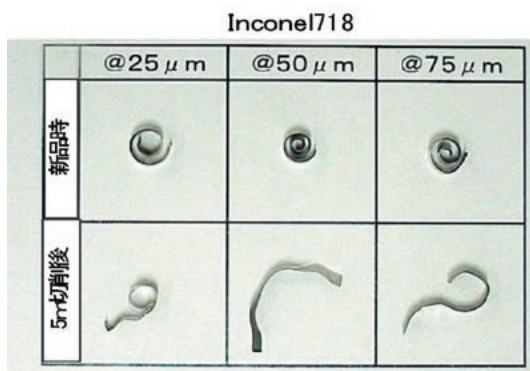
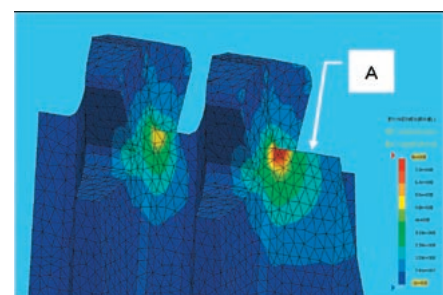


図9 切りくず形状



図10 刃溝ポケットに張付いた切りくず



応力集中の回避

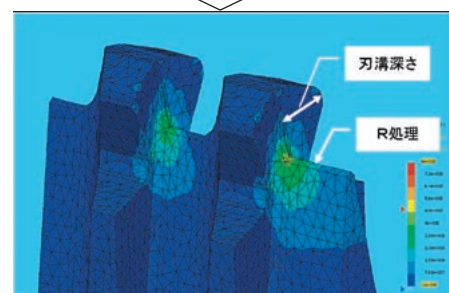


図12 頂部刃溝の設計

5. クリスマスブローチ加工事例

1) ガスタービンへの展開

航空機用エンジンディスクのブローチ加工分野で蓄積したノウハウを用い、同様な形状加工を行なう発電機用ガスタービンエンジンのクリスマスブローチ加工も行なっている。航空機用エンジンとガスタービンは兄弟のようなものであり(図13)、ブローチ加工の形状は同じであるが、ガスタービンは加工部位が大型(図14)であり、ブローチも1セットあたり50本程度とセット本数も数倍と多い。ワーク材質は主に耐熱鋼が用いられており、切削性は航空機用エンジンより良好である。

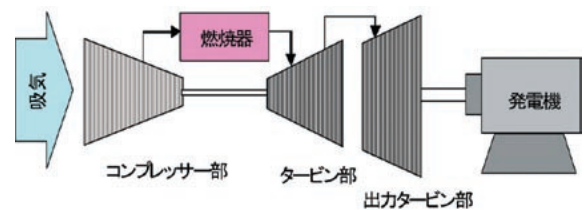


図13 ガスタービン発電機

	コンプレッサー	タービン
航空機		
ガスタービン発電機		

図14 航空機エンジンとガスタービン発電機の形状比較 (mm)

2) ブローチ盤

ブローチ加工には専用の加工機(ブローチ盤)を用いる。NACHIクリスマスブローチ盤は縦型シリーズと横型シリーズを展開している。代表的な縦型クリスマスブローチ盤SV-20-23Mを図15、および横型ブローチ盤NSL-35-S61MNCを図16に示す。水平方向に引き抜く横型ブローチ盤は引き抜きストロークが長く大型ディスクの加工に対応可能である。

縦型では1台で左右のねじれに対応することが可能であり、さらに図17のように複数列にブローチをとり付け、ブローチ盤のコンパクト化を図ることができる。

NACHIではお客様の加工ワーク、工場設備などの条件に合わせた最適なブローチ加工システムを提供している。

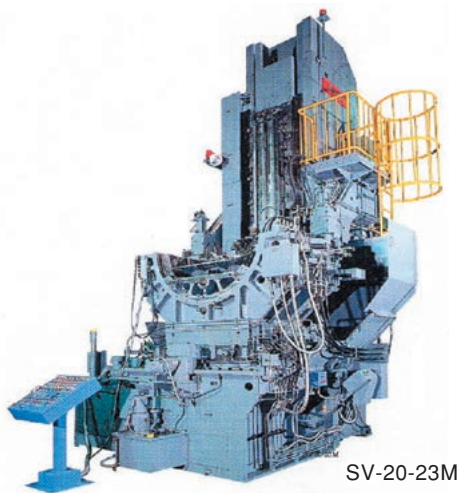


図15 クリスマスブローチ盤

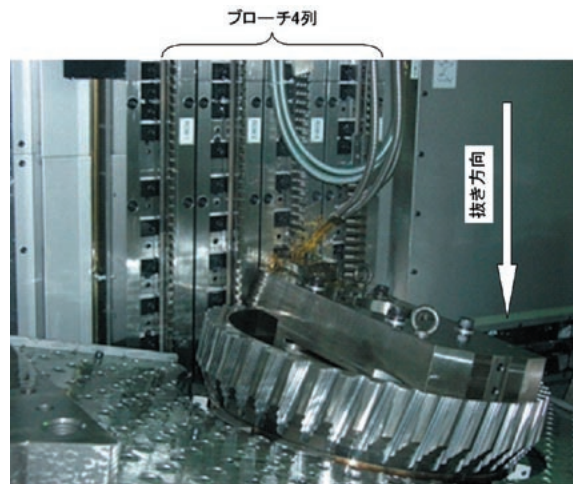


図17 クリスマスブローチ盤ワーク取付部

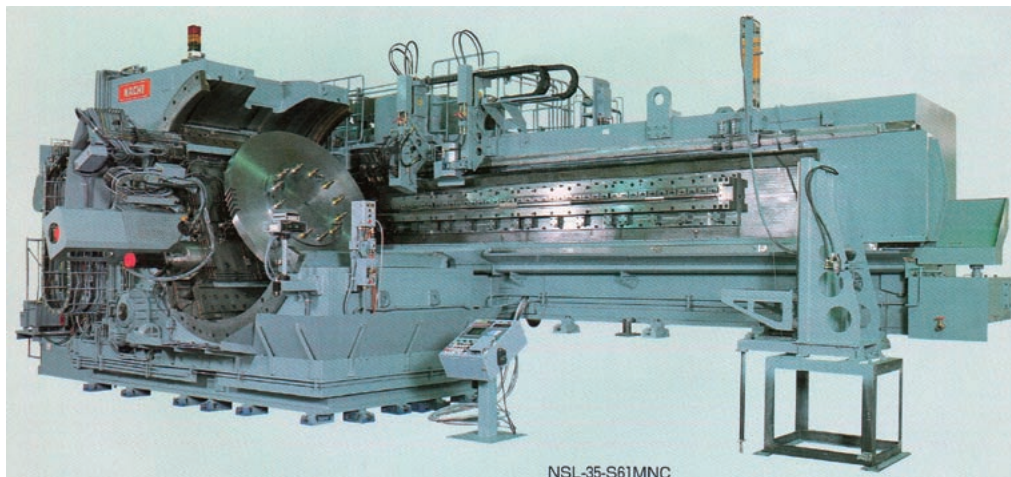


図16 横型クリスマスブローチ盤

6.地球環境問題の解決に、高効率ガスタービンエンジン

ガスタービンは、エネルギー効率がよく、発電所の発電設備、船舶等の動力さらには航空機のジェットエンジンとして活用されている。また、高効率ガスタービンエンジンは、NO_xやCO₂などの排出物が少なく、近年一層顕在化してきている地球規模の環境問題の解決に対して、エネルギーの有効利用と環境負荷の低減の要請にこたえ、航空機用や産業用など多くの分野で地球温暖化防止に大きく貢献している。

欧米の航空機メーカーは、新機種への高効率ジェットエンジンの採用を決め、大きく需要が拡大している。また、ガスタービン発電機は、2001年の世界的電力

危機から脱却し、アジア、中近東向けの大型発電機需要から、一般事業所向けの自家発電用まで幅広く需要が見込まれている。

これらのジェットエンジン、ガスタービンの生産において、クリスマスブローチの供給メーカーは世界で10社に満たない。

NACHIは、ブローチ盤・工具の改良をさらにすすめると共に、マシナリー、制御、材料部門などのシナジー効果を発揮し、より信頼性の高い高能率な加工システムを、世界市場に展開していく。

用語解説

※1 ブレード

クリスマス、およびダブテール溝によりディスク外周に植え込まれる羽根状の部品であり、コンプレッサーでは吸入した空気を圧縮し、タービンでは燃焼室からの排気を受けエンジンを回転させる機能を持つ。

※2 ダブテール

溝形状が「鳩の尾」(dove tail)に似ていることに由来し、主にジェットエンジンのコンプレッサーディスクに用いられる形状。

※3 サーフェス テクスチャ

加工面粗さ、きず、むしれなど、応力集中につながる最表面部の性状評価を示す。

※4 サーフェス インテグリティ

引張残留応力につながる表層部の組織変化、塑性変形を発生させない加工状態の評価であり、材料品位の完全性を示す。

参考文献

- 1) 西 良正:「航空用ジェットエンジン部品加工から見た諸問題」、日本機械学会誌、第85巻、第761号(1982.4)
- 2) 西 良正:「航空機用エンジン部品の加工」、生産財マーケティング(1981.3)
- 3) 「ガスタービンと過給機生産統計」日本ガスタービン学会誌、Vol.34、No.4(2006.7)
- 4) 「民間航空機関連データ集」、財団法人 日本航空機開発協会