

タービンブレード高精度加工用固定治具の開発

Development of Jig for High-precision Turbine Blade Machining

木 暮 昌 弘*

Masahiro KIGURE

原 浩 昭*

Hiroaki HARA

森 岡 武*

Takeshi MORIOKA

納 富 貴 幸*

Takayuki NOUDOMI

要 旨

ABSTRACT

高精度、低コスト、環境にやさしく量産に適用可能な製法をねらいとして、航空機用ガスタービンエンジンの主要部品であるタービンブレードの高精度加工に最適な加工用治具を開発した。

タービンブレードは3次元形状の翼部品で、高回転エンジンの性能を左右する最重要部品であり、耐熱合金の難削材で使用量が多いので精密鋳造で製造している。ブレード取り付け部は特殊形状で高精度が要求されるため、仕上げに精密研削加工を行っている。従来は翼面形状を基準として、低融点合金を流し込んだ一体型の固定治具を用い研削加工を行ってきたが、ブレードの固定および取り外しで、高温溶解工程があり、手作業の工数が多く量産には向きでなかった。

代替材として、自動車に採用されているリサイクルが可能な低コストの樹脂材に着目した。加工設備に多数個配置できる加工基準を持ったコンパクトな形状で、インサート成形製法で簡単に成形ができ、機械加工で高精度が達成できる剛性を持ち、加工後の治具取り外しでブレードの変形がなく、リサイクルが可能な樹脂であることを要件とした。実験に基づき適切な材料としてPPA材を選定し、固定治具に採用した。

A machining jig optimized for high-precision machining of turbine blades, which are principal parts in aviation gas turbine engines, was developed. The objective was methods of manufacturing that are high-precision, low-cost, environmentally considerate, and capable of application to mass production.

Turbine blades are airfoil parts with three-dimensional geometry, and they are the most important parts in determining the performance of high-speed engines. They are manufactured by precision casting because they employ large amounts of heat-resistant alloys that are difficult-to-machine materials. The blade attachment part has a special shape and requires high precision, and is therefore finished by precision machining. It used to be that low-melting-point alloys would be poured into a fixture jig, using the airfoil surface geometry as a reference, and the piece would then be machined. However, fixing the blade in place and removing it involved a high-temperature dissolution process, and the labor required for the manual steps made this method unsuitable for mass production.

An alternative material was sought in the recyclable, low-cost resins used in motor vehicles. The resin jigs were in a compact form machined to standards that would allow multiple blocks to be placed on the machining equipment; the material could be formed simply using the insert molding manufacturing process; it possesses the rigidity to allow high-precision machining; removal of the jig after machining would not result in blade deformation; and the resin should be recyclable. Based on experimentation, PPA was selected as the material and adopted for the fixture jig.

1. まえがき

ガスタービンエンジンは圧縮機、燃焼器、タービンで構成されており、航空機の推進やプロペラ、発電機、車両などの駆動に利用される。連続的に取り込んだ空気を圧縮機で高圧にし、燃焼器で燃料を加え着火、燃焼により高いエ

ネルギーを持つ燃焼ガスを得る。そしてこの燃焼ガスをタービンに送り込み、エネルギーの一部を回転運動として取り出す。この回転出力は圧縮機を駆動する動力源となる。タービンブレード(以下ブレードとする)はタービンを構成する部品であり、燃焼ガスを受ける翼形状部と、ディスクに組み付くツリー部から成る。このツリー部はタービ

*基礎技術研究センター

ン回転時に遠心力に耐え、ブレードをディスクに保持するように形状設計されている。その形状がクリスマスツリーに似ていることからツリー部と呼ばれ、重要な部分であるためミクロンオーダの寸法精度、面粗度が要求される。またブレードには翼形状外周にシュラウドと呼ばれる構造を持つものがあり、ディスクに組み付けた際に円環状になってガス漏れ、ブレードの共振を防止する (Fig. 1)。

ブレードにはNi基耐熱合金が使用される。遠心力に対するクリープ強度が重要なので、引っ張り応力の直角方向に結晶粒界がないように精密鑄造時に凝固速度を制御し、単結晶や一方向凝固の材料を得る。耐熱合金は熱伝導率が低く、硬くねばり強い難削材である。そのため切削工具の消耗が大きく加工コストが高い。またブレードは機械加工を行うための位置決め、固定が難しい部品であり、製造コスト増大の原因となっている。

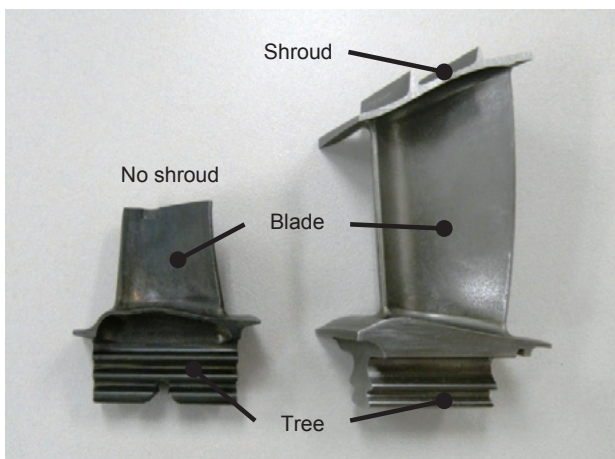


Fig. 1 Image of turbine blade

2. ブレード加工工程

2.1. 工程概略

まず耐熱合金のインゴットを真空中で加熱、溶解し、精密鑄造でブレード素材をつくる。続いてブレード素材を固定治具で位置決めし、ツリー部とシュラウド部の機械加工を行う。このとき工程間で寸法検査を実施する。加工後にブレードを固定していた固定治具を取り外し、バリの除去、表面研磨、洗浄工程を経て完成検査を行う。翼形状部は精密鑄造の状態で設計要件の寸法精度、面粗度を満たすので機械加工を行わず、素材のまま使用する。ツリー部、シュラウド部は精密鑄造のままでその設計要件を満たすことができないため、機械加工によって仕上げ加工を行う。

2.2. 従来のブレードの固定方法と問題

ツリー部およびシュラウド部を機械加工するために押えられる場所は機械加工を行わない翼形状部だけである。

しかし翼形状を直接押さえると変形するので機械加工できない。そのため翼形状を受け、変形させない固定治具が必要である。固定治具は翼形状を基準に取り付けられ、機械加工時に押さえ部となる。

固定治具には翼形状部を総形治具によって挟み込む方法と、何らかの固定材料で翼形状部を包み込む方法とがある。総形治具で挟みこむ方法は治具をブレードの種類ごとに機械で同時加工する数を準備する必要があり、初期の治具製造コストが高い。また精密鑄造で造られる翼形状部の寸法ばらつきに対応することが不可能であり、挟み込む際に翼面に傷を付けることがある。また加工中に押えが不十分になり位置ずれを起こし、寸法不良となる可能性がある。そのため固定材料で翼形状部を包み込む方法を採用し、固定材料には約 200℃ で溶解する低融点合金を用いていた。しかしブレードの固定時と、加工後の低融点合金取り外し時にブレードと低融点合金を加熱、冷却する必要があり、リードタイムが長いという課題があった。取り外す時にブレードに残った合金不純物を手作業で除去する必要があり、さらにリードタイムが長くなった。また低融点合金は重くて取り扱い性が悪く、材料コストが高いなどの課題があった。

3. 樹脂によるブレードの固定

3.1. 繊維強化熱可塑性樹脂による固定

安く、軽く、リードタイムの短縮が可能な固定治具を検討した結果、固定材料を低融点合金から繊維強化熱可塑性樹脂に置き換えることとした。一般に繊維強化熱可塑性樹脂は Fiber Reinforced Thermo Plastic (FRTP) といわれるものである。熱可塑性樹脂は冷却固化が速く、インサート成形でブレードを数分以内に固定することができる。繊維強化でない樹脂を使ったブレード固定方法が他社より特許出願されているが、繊維強化熱可塑性樹脂 (以下樹脂とする) を用いることで固定治具の剛性を高められる。より大きな加工負荷でも固定治具が変形しないので、ブレードの加工条件が改善でき、加工効率と品質の向上が期待できる。

樹脂を選定するためには成形性、ブレード加工効率、樹脂の取り外しやすさ、樹脂材料コストを総合的に評価、判断する必要がある。樹脂の特性値だけでその適合性を判断することができないため、数種類の樹脂を選出し成形、取り外しの実験を行って判断した。本論ではこの工程の特徴であるブレード機械加工前の成形、加工後の取り外しを中心に述べる。まず成形実験を行った。樹脂の特性値は成形状態で大きく異なるため成形品を観察、寸法測定して樹脂性能が発揮できる最適な成形条件を設定した。続いて取り外し実験を行い樹脂の取り外し方法を決めた。Fig. 2 にブレード素材と固定する樹脂外観を示す。

3.2. 成形金型

ブレード素材は精密鋳造で造られ、その寸法公差は 0.05 mm より大きい。そのためブレード素材と金型との隙間はインサート成形が可能であるとされる 0.05 mm よりも大きく設定する必要があった。この隙間は樹脂漏れの原因となり、樹脂寸法、機械特性を悪化させる。この課題に対しては成形条件による対応が必要であった (Fig. 3)。

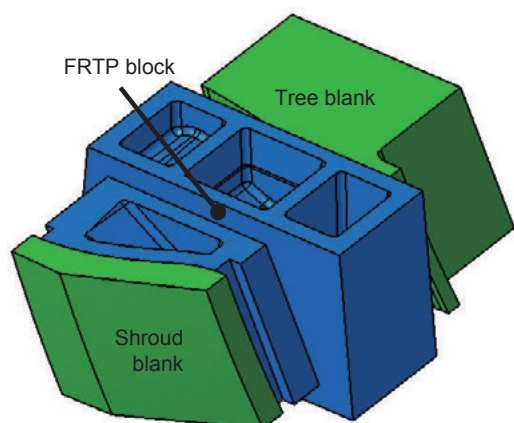


Fig. 2 Overview of turbine blade with F RTP block

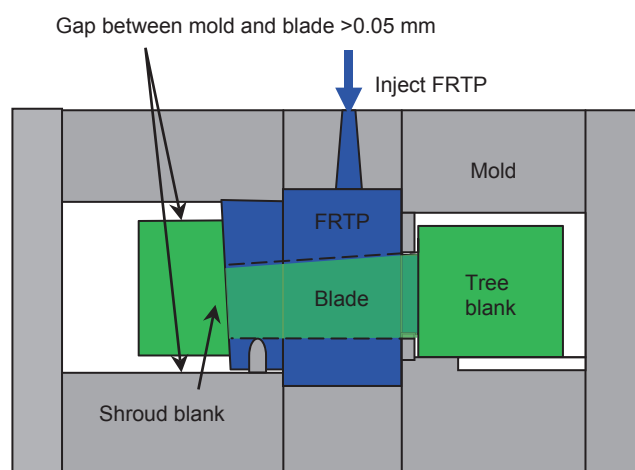


Fig. 3 Section view of insert mold

4. ブレードの固定

4.1. 樹脂選出

樹脂の選出に当たり以下の項目を検討した結果、ガラス繊維強化ポリフタルアミド (以下 PPA)、竹繊維強化ポリ乳酸 (以下 PLA)、ガラス繊維強化ポリプロピレン (以下 PP) の 3 種類を固定材料の候補とした (Table 1)。

(1) 耐薬品性

薬品に対する樹脂の耐性である。使用する切削液、洗浄液、オイルなどに侵されず、特性変化を起こさない樹脂を使用する。

Table 1 Material data sheet of selected F RTPs

	PPA	PLA	PP
Resin content	Polyphthalamide	Polylactic acid	Polypropylene
Fiber content	Glass	Bamboo	Glass
Fiber weight ratio (%)	45	60	40
Density (kg/m ³)	1560	1390	1220
Young's modulus (GPa)	13.8	4.4	9.5
Charpy absorbed energy (kJ/m ²)	10.3	3.3	37
Mold shrinkage (%)	0.6	0.3	0.7

(2) 弾性率

固定治具の剛性の指標となる機械的性質。値が大きいほど負荷が加えられたときの治具変形量は小さい。

(3) コスト

市販されているもので安く、入手しやすい流通量が多い樹脂を使用する。

(4) 成形収縮率

成形品の寸法精度、変形に影響する値である。値が小さいほど固化時の収縮量が小さい。異方性は小さい方がよい。

(5) 衝撃強さ

樹脂を取り外すとき、割れやすさを判断する指標となる値である。樹脂に衝撃的な荷重を加え、破壊するのに要したエネルギー量であり、値が小さいほど割れやすい樹脂だといえる。

(6) 環境適合性

環境負荷が小さい樹脂を使用する。その樹脂がリサイクル可能かどうか、生分解性を有するなど廃棄しやすい材料であるかどうか判断する。

4.2. 成形条件

樹脂成形においては、樹脂が良好な流動性を持ち、低圧力かつ短時間で金型の隅々まで充填され、均一に冷却、固化されることが理想的である。しかし今回のブレードインサート成形においては、前述のようにブレード素材と金型との間に大きな隙間があり、樹脂メーカーの推奨する成形条件では樹脂漏れを起こした。そのため隙間付近の樹脂流動性を落として樹脂漏れを防ごうとした。樹脂流動性を落とすには熔融温度を下げる方法と、金型温度を下げる方法とが考えられる。樹脂の熔融温度を下げる方法は樹脂流動

性が低下するため射出圧力を上げる必要があり、これは樹脂漏れ防止と相反する。さらに熔融温度を下げることで、熔融不足による脆化を引き起こす可能性が高くなる。よって樹脂熔融温度を下げる方法は適切ではないと判断した。金型温度を下げる方法は上記のような欠点がない。通常金型温度を変えることは行われていないが、射出圧力を上げずに金型に接する樹脂流動性を局所的に制御する新しい試みであり、射出成形の応用範囲が広がる可能性がある。と判断した。

成形条件として調整すべきパラメータは以下の四つである。

(1) 樹脂温度および樹脂射出圧力

樹脂温度、射出圧力ともに高い方が樹脂流動性は良好になり成形、充填しやすくなるが樹脂は漏れやすくなる。樹脂温度は樹脂が熱分解しない範囲において、樹脂漏れしない程度高めに設定する。樹脂射出圧力は低い値から設定し、充填状態によって調整する。

(2) 金型温度

金型温度は高い方が金型内で樹脂が冷え難く、樹脂流動性が良いので樹脂を充填しやすい。一般的に金型温度は樹脂のガラス転移温度よりも高めに設定されるが樹脂が漏れやすくなる。また冷却時の樹脂収縮量が大きくなるので、ひけが発生する原因となる。そのため金型温度は充填に十分な樹脂流動性を保ちつつ、できるだけ低く設定する。

(3) 射出速度

射出速度が高い方が樹脂は速く金型内に送り込まれる。樹脂の流動性が良いまま充填されるので充填密度が高まり金型形状の再現性が良好になるが、射出速度が高いほど樹脂は漏れやすい。射出速度は樹脂が漏れない範囲で高く設定する。

(4) 保圧

保圧は高い方が樹脂の固化時に樹脂を押し込み続けられるので充填密度が高まるが、樹脂が漏れやすくなる。また保圧を過大にかけ過ぎると樹脂内部の残留応力が高まり、離型後に変形を起こす原因となる。保圧は樹脂漏れを起こさず、変形のない程度で高めに設定する。

今回は樹脂漏れを起させないために、金型温度を低めに設定し、樹脂漏れしない範囲で射出速度を可能な限り高速側に調整して最適条件を得る実験を行った。射出速度を上げることで樹脂流動性が低下する前に樹脂が金型内に行き渡ることになり、樹脂均一化および製品形状の再現性が良好となる。金型温度と射出速度の関係について PPA を例に取り説明する (Fig. 4)。

使用した PPA のガラス転移点は 123 °C であり、メーカー推奨金型温度は 135 °C 以上であるが、この実験では 100 °C と 120 °C を設定して実験を行った。金型温度 100 °C

の実験では充填不足と、冷えた樹脂同士が接触した境界跡が残るウェルドラインと呼ばれる外観不良が発生した。不良を改善しようと射出速度をさらに上昇させたが、不良が無くなる前に樹脂漏れを起こし、樹脂流動性が改善されず、樹脂が十分に充填できなかった。充填不足では樹脂の機械特性が十分に発揮できない。そのため金型温度 100 °C では適切な条件設定ができないと判断した。

金型温度 120 °C では金型温度の上昇によって樹脂流動性が改善し、その制御も可能となった。射出速度の上昇で樹脂充填不足とウェルドラインは樹脂漏れを起こす前に無くなった。実験の結果、樹脂漏れ、歩留まりが悪化する射出速度が明確となり、最適な射出速度を見いだすことができた。

次に保圧と樹脂射出圧力の関係を PP, PPA を例に取り説明する。射出成形は金型に樹脂を充填する射出工程と固化させる冷却工程とに分けられる。射出工程で樹脂を押し出すために加えられる圧力が射出圧力であり、固化の過程で加えられる圧力を保圧と呼ぶ。

樹脂は冷却固化時に収縮する。この収縮により充填された樹脂と金型との間に隙間ができると、金型に接していない樹脂の冷却速度が金型に接している樹脂のそれよりも遅くなる。この冷却速度差によって樹脂内部に残留応力が生じ、成形品が変形する原因となる。この対策として、樹脂が流動性を維持した状態であれば樹脂を追加供給することが有効である。

射出圧力は樹脂の種類、熔融温度と金型温度、形状などにより総合的に決められる。今回は射出速度によって成形を制御しており、射出圧力はできる限り低めに設定した。保圧は樹脂の充填密度向上、金型との接触確保に寄与する。そのためブレードのインサート成形では樹脂とブレードを密着させ、確実に固定するために重要である。よって保圧は樹脂漏れを起こさず、歩留まりの良好な範囲においてできる限り高く設定した。

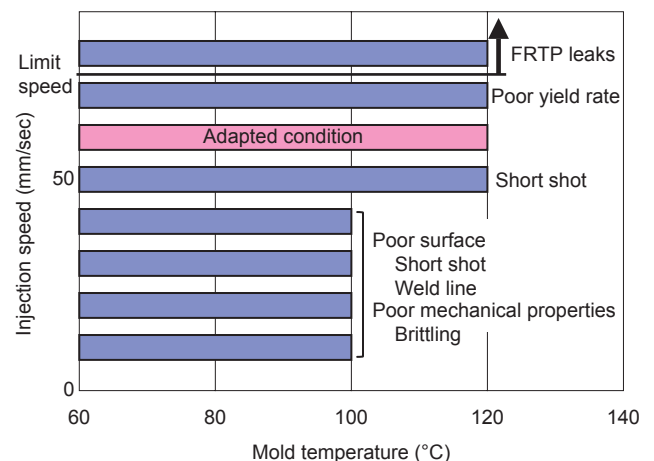


Fig. 4 Injection speed - mold temperature diagram

PP, PPA において射出圧力と保圧の関係について実験を行った (Fig. 5). まず PP での実験結果を説明する. PP のガラス転移温度は常温以下であり, 金型が室温でも十分な流動性を示す. このため射出圧力を 50 MPa と低めに設定し, 保圧は射出圧力より低い 20 MPa から上昇させ, 樹脂の充填状態を確認する実験を行った. 保圧を射出圧力と同じ 50 MPa としても収縮によるひげが大きく, 充填不足と変形が生じるが, 保圧を射出圧以上にも上昇させるとひげが改善され, 保圧が 100 MPa に達するまで樹脂漏れを起こさないことが判明した. 最終的に歩留まりを考慮し, 保圧は 80 MPa を採用した.

続いて PPA の実験結果を説明する. PPA では金型温度がガラス転移温度より低く, 射出速度も遅めに設定されているため, 流動性が著しく低下する. これより射出圧力はメーカー推奨値よりも高めの 200 MPa に設定し, 保圧は PP 同様に射出圧力より低い 80 MPa から上昇させて充填状態の確認を行った. 保圧 80 MPa においては若干の充填不足, 変形が観測されたが, 保圧の上昇とともに改善された. 保圧が 150 MPa を超えると樹脂漏れが確認されたため, 歩留まりを考慮して 140 MPa を最適値と判断した. この値は射出圧力よりも低い.

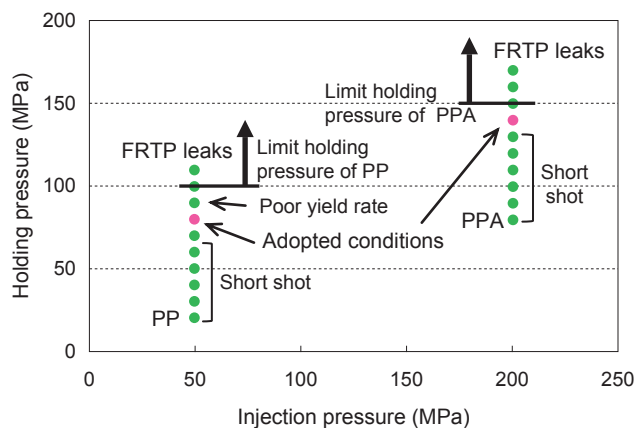


Fig. 5 Holding pressure - injection pressure diagram

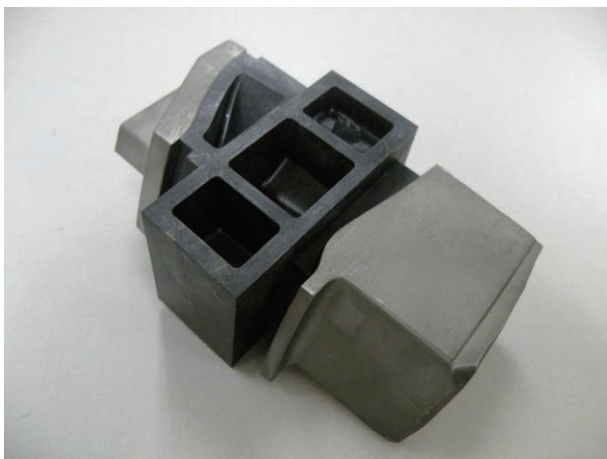


Fig. 6 Turbine blade with F RTP block

このように成形実験を行い PPA, PP, PLA それぞれで樹脂漏れを起こさない成形条件を設定することができた. 以下にブレードをインサート成形し, PPA で固定した例を Fig. 6 に示す.

樹脂の選定については樹脂の取り外しにて判断を行う.

5. 樹脂取り外し

5.1. 取り外し方法

ブレードを固定していた樹脂は加工後に安全かつ簡単に, 短時間で取り外さなければならない. 樹脂の取り外し方法について以下五つの方法を比較検討し, 分割による方法がブレードと樹脂の温度変化が無く, 取り扱いやすいために最も作業効率が高いと判断した.

(1) 燃焼

樹脂に着火し, 燃やす方法. ブレードが高温に加熱され, 酸化, 汚損, 変形などが懸念される. 安全面でも問題があり, 樹脂のリサイクルは不可能.

(2) 加熱

ブレードを炉に入れるなどし, 樹脂を加熱, 溶融して取り外す方法. ブレード表面に溶着した樹脂を除去する必要がある. 樹脂のリサイクルは可能.

(3) 化学処理

薬品または紫外線等で樹脂を脆化させて取り外す方法. 処理時間が長く, 作業者の安全確保が必要で設備が大掛かりになるためコストが高い. 樹脂のリサイクルは不可能.

(4) 冷却

樹脂を液体窒素などで冷却し, 脆化させてから取り外す方法. 冷媒が必要で作業の安全確保が必要となる. 樹脂のリサイクルは可能.

(5) 分割

樹脂に荷重を加え, 割って取り外す方法. 温度変化が無く, 取り扱いやすい. 樹脂のリサイクルが可能. ただし, 取り外す時, 樹脂に加えた荷重によりブレードが変形してはならない.

5.2. 分割による樹脂取り外し

分割による樹脂取り外し方法はブレードが変形しないことが前提条件である. このため樹脂に加える荷重を小さくする必要がある.

シュラウドがなく, アンダーカットのないブレードにおいて実験を行った. 油圧ハンドプレスで樹脂に直接荷重を加え, 曲げによる引っ張り応力で樹脂下面に設けたくさび状のノッチから亀裂を進展させた (Fig. 7).

このとき分割に必要な荷重は PPA で 1800 N, PLA で 500 N, PP で 1500 N であり樹脂のブレードへの溶着, ブレード変形は PPA, PLA, PP どれにも見られなかった.

PPA と PLA で生じた亀裂は瞬間的に翼断面の前縁側から反対側へ進展し、樹脂は二つに割れてそのままブレードを取り出すことができた。PPA は荷重が加わって数ミリメートル樹脂ブロックが押し込まれ、変形してからノッチに亀裂が入って割れた。PLA は特に脆性が大きく、樹脂ブロックがほとんど押し込まれないうちにブロックが割れてブレードを取り出すことができた。PP は亀裂の進展が途中で止まり、押し込んで荷重を加え続けても樹脂が変形するだけでブレードを取り出すことができなかった。油圧ハンドプレス工程だけでブレードを取り出せないため、手作業で樹脂を割って除去した。PP は取り外しで不利な樹脂であると判断し候補から外した (Fig. 8)。

この実験においてブレードの変形は無かったが、この分割方法は樹脂ブロックの変形によってノッチに亀裂を発生させるため、ブレードの剛性が低い場合、ブレードの変形が懸念され実用的でないと判断した。ブレードの剛性に影

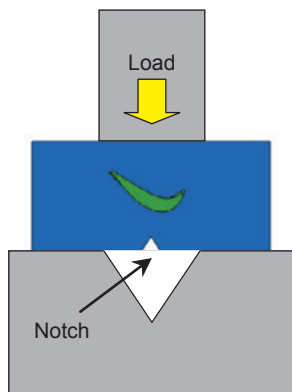


Fig. 7 Breaking method with notch



Fig. 8 Results of breaking method with notch

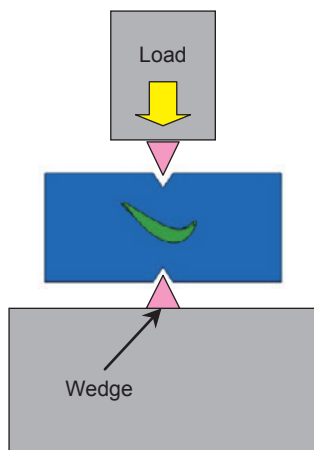


Fig. 9 Breaking method with 2 wedges

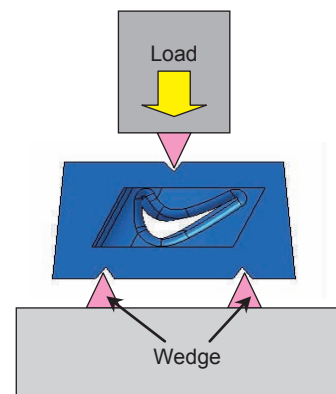


Fig. 10 Breaking method with 3 wedges from 2 sides

Table 2 Comparison of breaking load

	Breaking load	
	Notch	2 wedges
PPA	1800 N	100 N
PLA	500 N	30 N
PP	1500 N	N/A

響されない樹脂の分割方法を検討し、局部的に荷重を加えて樹脂を分割する方法を考えた。PPA と PLA を用いて次の実験を行った。樹脂上下面に設けたノッチにくさびを挿入し、局部的に荷重をかけた。このとき樹脂に設けたノッチはくさびのガイドの役割を果たす (Fig. 9)。

実験の結果 PPA の分割に必要な荷重は 100 N 以下、PLA では約 30 N となり、取り外されたブレードに変形は無かった (Table 2)。これは先の実験での分割時の荷重に比べ大幅に小さく、亀裂が発生する際の樹脂の変形が局部的で小さくなる。くさびを用いて荷重を加える方法で PPA, PLA に亀裂を発生させ、分割できることが分かった。

5.3. 分割数の検討

これまでの説明はシュラウドの無いブレードについてのものであった。しかし実際のブレードには外周部にシュラウドを持つことでアンダーカットを生ずるものがある。シュラウド付きブレードではシュラウド内側およびブレード翼面側がアンダーカット形状となっている。このアンダーカットにより 2 分割では樹脂を取り出すことができない。アンダーカット部の樹脂を取り外すためにより細かく分割することを検討した。

最初に樹脂を 3 分割することを考えた。PPA, PLA について樹脂上面に 1 か所、下面に 2 か所のくさびを配置した。分割時の治具概略を Fig. 10 に示す。

Table 3 Results of breaking method with 3 wedges from 2 sides

	Breaking load	Results	Yield rate (%)
PPA	500 N	Crack was unstable. Half of blocks were left.	50
PLA	50 N	Crack was unstable. 90% of blocks were left.	10

PPA, PLA とも割れ方が安定せず、樹脂が取り外せない場合があった。PPA の歩留まりは約 5 割、PLA では約 1 割であった (Table 3)。下側にくさびを 2 か所配置したが、左右どちらか一方のくさびのみ亀裂が生じ、残りのくさびでは亀裂が全く生じない現象が起こった。実験では樹脂下面に 2 か所のくさびから左右対称に亀裂が生ずることは稀であり左右非対称に亀裂が進展した (Fig. 11)。

また PLA ではブレード翼面に樹脂の溶着、変色が見られた。この現象はシュラウドのないブレードでは認められず、シュラウドがついた場合に金型と成形条件の違いによって発生したものと考えられる。これより、シュラウド付きのブレードにおいて PLA は不適切だと判断し候補から外した。

樹脂を 3 分割する方法の結果から、1 面に 2 か所くさびを配置する方法は難点があり、亀裂を安定して生じさせるためにくさび位置を検討し直した。そこで樹脂の 4 面を使い、各面に 1 か所ずつくさびを配置する方法とした。有限要素法によって応力分布を計算した結果、この方法においてはくさび周辺の応力の増加が局部的であり、ブロックの変形を抑えてブレードに影響を与えないことが予想された (Fig. 12)。

ハンドプレスの 1 工程で 4 面に荷重をかけるための専用治具をつくった。これはシリンダーの下降運動を利用して上下方向および左右方向から樹脂を挟み込む機構である (Fig. 13)。

4 面に 1 か所ずつくさびを配置した実験は PPA のみ実施した。実験では荷重 200 N で四方全てから均一な亀裂が入り、安定して割ることができた。課題であったアンダー

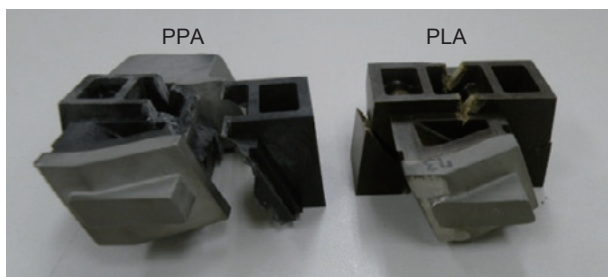


Fig. 11 Result of breaking method with 3 wedges from 2 sides

カット部の樹脂も取り外すことができ、繰り返し実験を行っても安定して亀裂が生じることを確認した (Fig. 14)。また樹脂取り外し工程に要する時間は約 1 分であり、安全に短時間でブレードから樹脂を取り外せることも確認できた。よってこの分割方法を採用し、樹脂取り外し実験により亀裂が進展しやすく、ブレードに溶着しない PPA をブレードの固定材料とした。

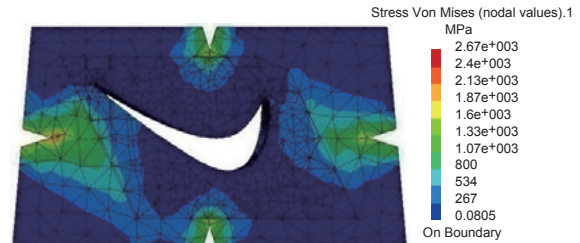


Fig. 12 Stress contour of FRTP block

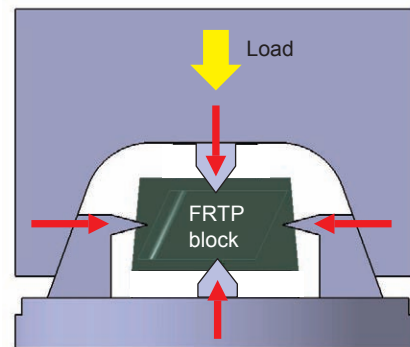


Fig. 13 Breaking method with 4 wedges from 4 sides

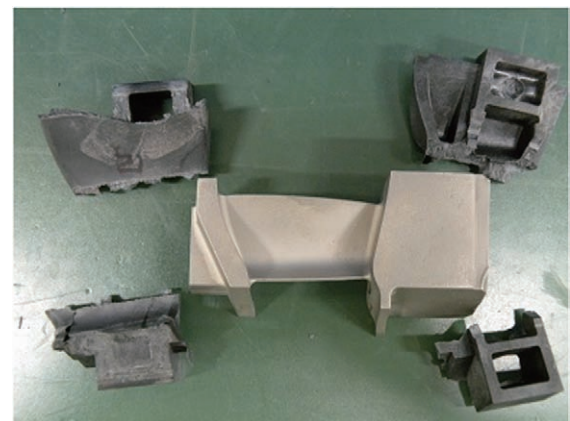


Fig. 14 Result of breaking method with 4 wedges from 4 sides

6. まとめ

- (1) ブレードを樹脂で固定する工程、インサート成形において、金型表面に接する樹脂流動性を局所的に制御し、金型との隙間から樹脂を漏らさずに成形する最適条件を見いだした。

(2) ハンドプレスと専用治具を使い、樹脂を分割して安全に効率良くブレードから取り外す方法を見いだした。これにより樹脂のリサイクルも容易となる。

(3) ブレードの固定に用いる材料として PPA, PP, PLA を選出、成形、加工、樹脂取り外し実験を行い比較した結果、PPA を最適な材料として選定した。

以上により、ブレード固定治具材料を低溶融合金から PPA に置換することができた。これより工程が簡素化、短縮され、ブレードの固定コストを削減することが可能となった。また軽量化によって作業時の取り扱い性も向上した。

■ 著 者 ■



木暮昌弘



森岡 武



原 浩昭



納富貴幸