

# 複合材ファンシステム研究開発

## Development of Composite Fan System

村 上 務 航空宇宙事業本部民間エンジン事業部技術部 主査  
盛 田 英 夫 航空宇宙事業本部民間エンジン事業部技術部 主幹 博士（工学）  
及 川 和 喜 航空宇宙事業本部民間エンジン事業部品質保証部 主査

複合材ファンシステム研究開発プロジェクトでは、次世代民間エンジンへの適用を目指して複合材構造部品の開発に取り組んできた。これまでに本研究開発を通して複合材ファンケースおよび複合材 SGV の技術実証が完了し、Airbus A320neo に搭載される PW1100G-JM エンジンへの適用が決定している。本稿では両部品の開発の概要について述べる。

The Composite Fan System R&D Project was created to develop composite structural parts for the fans used in next-generation commercial aero-engines. The technology developed for the composite fan case and composite structural guide vane has been completed and demonstrated. These two parts will be applied to the PW1100G-JM, which powers the Airbus A320neo. This paper gives an outline of the development of the composite fan case and composite SGV.

### 1. 緒 言

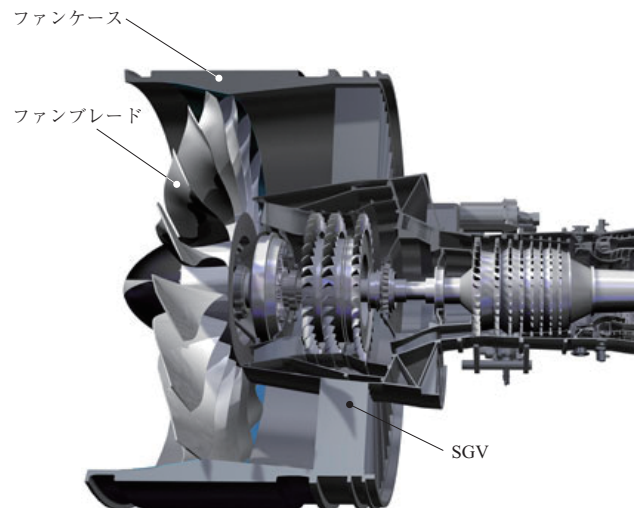
近年、航空機エンジンに対する低燃費化の要求は一層厳しく、新たに開発されるエンジンではより高いバイパス比の設計となり、従ってファン径が同クラスの従来エンジンよりも大きくなってきている。もともとエンジン重量に占める割合の大きいファン部品の重量の割合がさらに増加することになるため、軽量化ファンに対する期待は大きい。

当社では 2007 年から複合材ファンシステムの開発を進めてきた。本研究開発は、高バイパス化によって大型化する代表的構造部品である、① ファンケース ② ストラクチャルガイドベーン (Structural Guide Vane : SGV) ③ ファンブレード、に対して複合材技術を適用し軽量化を図ることを目的としている。第 1 図に複合材ファン部品を示す。

本稿では、これら 3 部品のうち、Airbus A320neo に搭載される PW1100G-JM エンジンへの採用が決定したファンケースと SGV の開発について、概要を紹介する。

### 2. 研究開発の概要

航空機ファン構造部品への複合材料の適用において、最大の課題は耐衝撃性である。一般に複合材料は耐衝撃性に弱いとされるが、ファンブレードや SGV は運航中に鳥衝突 (バードストライク) が想定されるため、その材料



(提供: Pratt & Whitney 社)

第 1 図 複合材ファン部品  
Fig. 1 Composite fan parts

には鳥衝突後も構造部品として健全性を保つことが可能な、非常に高い耐衝撃強度が求められる。これに対して、ファンケースは万一ファンブレードが破断した場合 (Fan Blade Off : FBO) にもファンケースから外に飛び出さず、ファンケース内に閉じ込めるコンテインメント性が求められる。このためファンケースの材料には撃ち込み衝撃に対する高いエネルギー吸収性能と非貫通性が求められる。この特徴は耐弾性に類似している。

本研究開発はビルディング・ブロック手法に基づいて進

められた。ファンケースの例を第2図に示す。クーポン（試験片）試験として平板への高速衝撃試験を実施して材料を選定し、サブ・コンポーネント試験として実機大の円筒から切り出した曲面パネルおよび2分の1円筒の高速衝撃試験、そしてコンポーネント試験として実機スケールのファンケースに回転するファンブレードを切り離して飛ばすFBO試験が行われた。

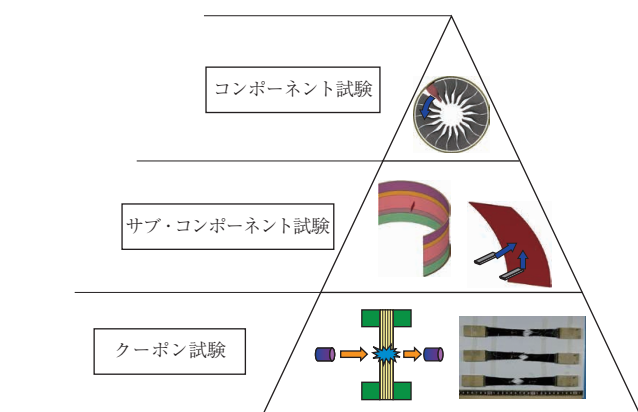
ファンブレード/SGVについても同様にクーポン試験を通して材料・成形方法を選定し、サブ・コンポーネント試験、コンポーネント試験で実証するアプローチを行った。

### 3. ファンケース開発

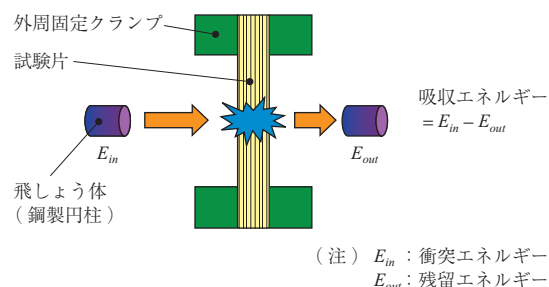
#### 3.1 クーポン試験（平板衝撃試験）

ファンケースに適したエネルギー吸収能力が高い材料を選定するため、比較的小さいサイズの平板への高速衝撃試験を行った。候補材料は強化形態と成形法によって3種類の材料系を選択した。その3種類は、①三次元プリフォームとRTM（Resin Transfer Molding）の組合せ（3D-RTM）②高じん化プリプレグ材のオートクレーブ成形（高じん化プリプレグ材）③改良エポキシ樹脂とフィラメントワインディング（FW）の組合せである。このうち、FWに使用したエポキシ樹脂は本開発のなかで改良を進めたものを使用した。高速衝撃試験は、試験平板の外周を固定し、飛しょう体（鋼製円柱）をエアガンで試験板の中央に打ち込むのである。評価は、飛しょう体が試験板を貫通した際の貫通前後の速度から求められる吸収エネルギーによって行う。第3図に平板衝撃試験を示す。

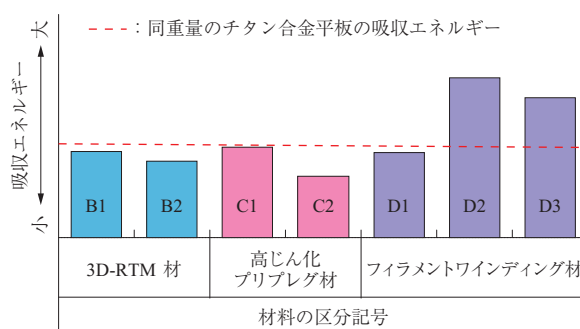
各種材料の吸収エネルギーの試験結果を第4図に示す。破線は重量が同じチタン合金の平板の結果である。この図



第2図 ビルディング・ブロック  
Fig.2 Building block



第3図 平板衝撃試験  
Fig.3 Coupon impact test



第4図 各材料の吸収エネルギー  
Fig.4 Coupon impact test, screening result

に見られるように、3D-RTMと高じん化プリプレグ材の吸収エネルギーはチタン合金の吸収エネルギーと同等かそれ以下であるが、FW3種の改良エポキシのうちD2とD3の吸収エネルギーは高く、特にD2ではチタン合金の1.5倍以上の値が得られた。ほかの試験片が衝突部周辺のごく狭い範囲で変形しているのに対して、D2はより広い範囲が膨らむように大きく変形しており、この差が高い吸収エネルギーに寄与していると考えられる。

一連のクーポン試験の結果から、ファンケース材料と成形法としてD2樹脂を用いたFWを採用することとし、この材料系についてビルディング・ブロック上位の各サブ・コンポーネント試験およびコンポーネント試験を実施した。

#### 3.2 サブ・コンポーネント試験

##### (1) カーブドパネル衝撃試験

第1段階のサブ・コンポーネント試験はカーブドパネル衝撃試験である。これは実機大の円筒から8分の1円の円筒面を切り出して試験体とし、これにチタン合金平板をエアガンで打ち込む試験である。

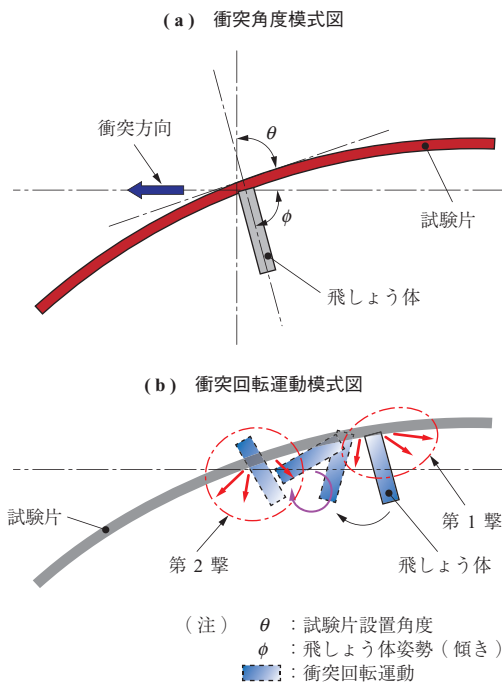
FBOに際し、破断したファンブレードがファンケースに衝突する挙動は、平板試験のような正面衝突とは異なり、非常に複雑である。ブレードはある姿勢（傾き）とある衝突角をもってファンブレード

ド先端からファンケース内面に衝突する。これが第1撃である。ここで突き抜けない場合にはファンブレードは転がるように回転し、次にブレードのエンジン軸側（ハブ側）がファンケース内面に衝突する。これを第2撃と呼ぶ。この挙動とケースの損傷を評価するサブ・コンポーネント試験がカーブドパネル衝撃試験である。第5図にこれを模式的に示す。飛しょう体の挙動とパネルの損傷については衝撃解析も行い、解析的に予測可能であることを確認した。第6図にカーブドパネル衝撃試験と解析結果の一例を示す。

(2) ハーフリング衝撃試験

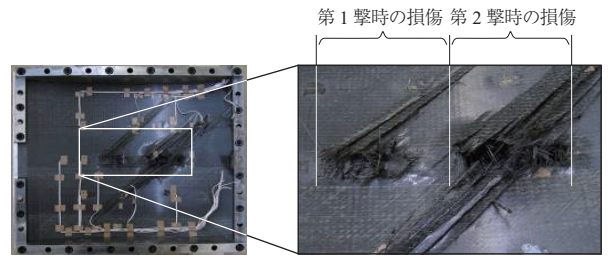
カーブドパネル衝撃試験での飛しょう体は重量が数十g程度であり、実機のファンブレード重量との差は大きい。そこで、ファンブレード重量と同等重量の飛しょう体でのコンテナ性能の評価を行うため実機形状の円筒の2分の1円筒での撃ち込み衝撃試験を行った。これがハーフリング試験（第7図）である。図に模式図と飛しょう体が衝突する瞬間の様子を示す。この試験では、飛しょう体は試験体に垂直な姿勢で、かつ垂直に撃ち込まれた。

平板衝撃試験、カーブドパネル衝撃試験、ハーフリング衝撃試験の結果をまとめ高速衝撃試験におけるコンテナ性能のスケール効果を評価した。

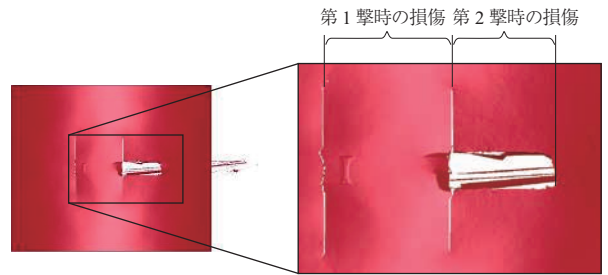


第5図 カーブドパネル衝撃試験  
 Fig. 5 Schematic of curved panel impact test

(a) カーブドパネル衝撃試験結果

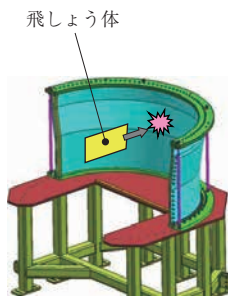


(b) カーブドパネル衝撃解析結果

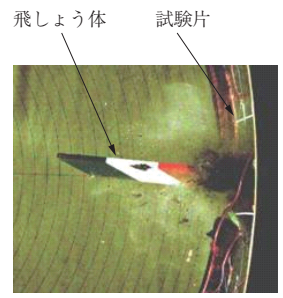


第6図 カーブドパネル衝撃試験と解析比較  
 Fig. 6 Damage mode correlation between test and analysis

(a) ハーフリング試験模式図



(b) 飛しょう体衝突時の様子



第7図 ハーフリング試験  
 Fig. 7 Half ring impact test

3.3 コンポーネント試験（FBO 試験）

ビルディング・ブロックの最終段階として、FBO 試験を行った。この試験は、前段階までの各種試験の結果によって設計されたファンケースの実機サイズの試験体に、チタン合金製ファンブレードを実機と同様に組み込み、回転するファンブレードの1枚のダブテール部（固定部）を火薬によって解放し、ファンケースがこれを閉じ込める（コンテナ）ことができることを確認するものである。第8図にFBO 試験を示す。ファンブレードが解放された直後の様子を示す。FBO 試験の結果ファンケースに損傷は見られるものの、ファンブレードはコンテナされ設計の妥当性が示された。

4. 複合材 SGV 開発

4.1 クーポン試験（ゼラチン衝撃試験）

ファンブレード／SGV に適した耐衝撃性の高い材料を

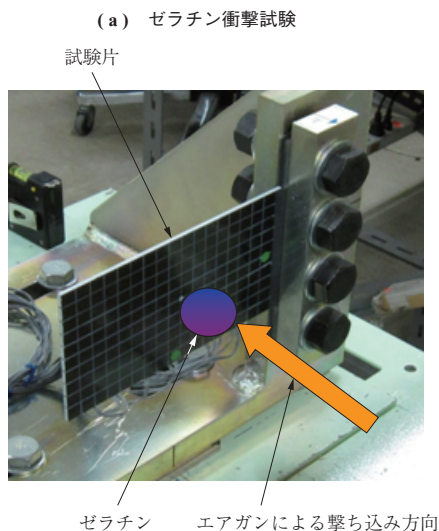


第 8 図 FBO 試験  
Fig. 8 Containment rig test

開発するため、平板へのゼラチン高速衝撃試験を行った。試験は、翼を模擬した平板試験片に対して、鳥を模擬したゼラチン球をエアガンで試験片中央に打ち込むものである。衝撃によって試験片端部が波打つように変形し、損傷モードとしては主に層間剥離が生じる。評価は、ゼラチンの衝撃エネルギーに対する層間剥離面積によって行う。

ゼラチン衝撃試験および結果を第 9 図に示す。耐衝撃複合材料として実績のあるタフエポキシ材 (E 材) および熱可塑複合材 (F 材) をベンチマークとして、繊維樹脂界面の改良を重ねた結果、より層間剥離損傷の小さい熱可塑複合材 (C 材) を開発できた。

本試験の結果から、ファンブレード / SGV 材料と成形法として C 材を用いたプレス成形を採用することにし、この材料系についてビルディング・ブロック上位の各サブ・コンポーネント試験およびコンポーネント試験を実施した。



第 9 図 ゼラチン衝撃試験および結果  
Fig. 9 Gelatin impact test and results

#### 4.2 SGV サブ・コンポーネント試験 (単翼試験)

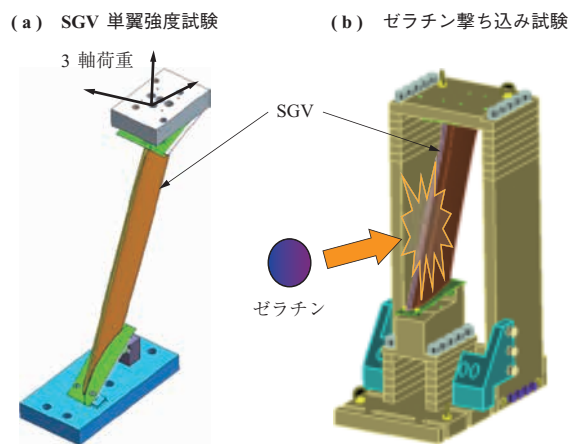
第 10 図に SGV サブ・コンポーネント試験を示す。

##### (1) SGV 単翼強度試験

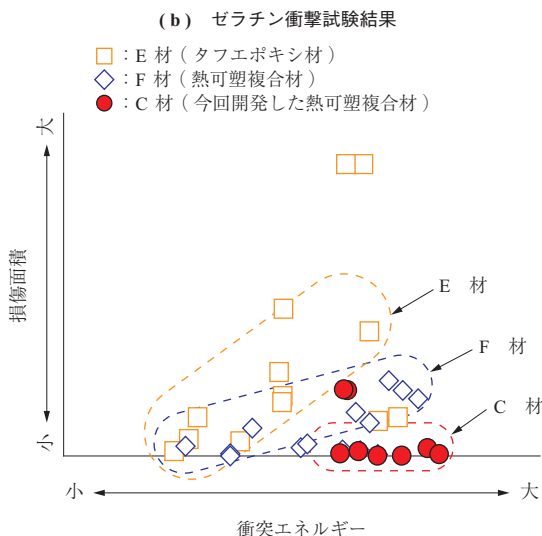
クーボン試験で選定されたウェッジ接合形態を採用した実機サイズ SGV を供試体とし、供試体の一端を固定し他端にエンジン運転時の荷重を掛ける SGV 単翼強度試験を実施した。試験の結果、通常運航時の繰返し荷重、FBO 時に SGV に掛かる最大荷重の両条件とも問題なく、健全性が確認できた。

##### (2) ゼラチン衝撃試験

実機サイズ SGV を供試体とし、重量 2.5 lb の鳥の衝突を模擬したゼラチン衝撃試験を実施した。実際の鳥は SGV 衝突前にファンブレードに衝突することから、解析にてファンブレード衝突後の鳥の状態を予測し、それに基づいた重量・形状のゼラチンを用いた。試験後の供試体は外観・非破壊検査とも



第 10 図 SGV サブ・コンポーネント試験  
Fig. 10 SGV sub-component test



に損傷は確認されず、SGV の耐衝撃性が確認できた。

#### 4.3 SGV コンポーネント試験 (SGV フルリング試験)

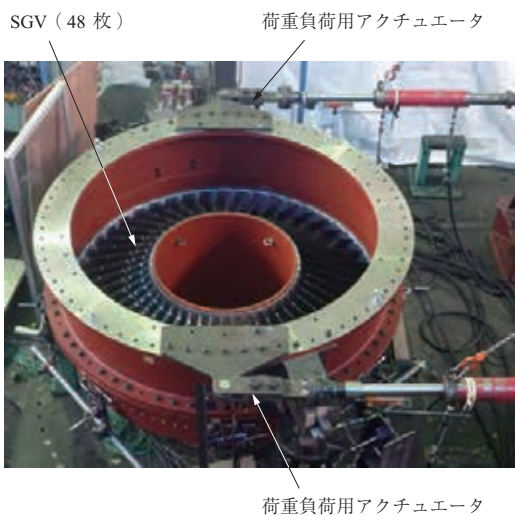
エンジン 1 台分 48 枚の実機サイズ SGV を、ファンケースやファンフレームを模擬したジグに組み付け、アクチュエータを用いてエンジン運転時の荷重を掛けるフルリング試験を実施した。第 11 図に SGV フルリング試験を示す。試験条件は FBO 時に SGV に掛かる最大荷重 (FBO 試験) および FBO 後に空港に帰還するまでの間の振動による繰返し荷重 (Fly Home 試験, 20 万サイクル), の 2 条件とした。両試験とも試験完了まで供試体が剛性を維持できており、健全性を実証できた。

### 5. PW1100G-JM への採用

本技術開発で開発された複合材ファンケースおよび複合材 SGV は PW1100G-JM に採用され、2013 年 8 月現在エンジン試験を実施中である。第 12 図に PW1100G-JM および複合材ファンケース、第 13 図に PW1100G-JM 複合材 SGV の外観を示す。

### 6. 結 言

複合材ファンケース、複合材 SGV の技術開発および技術実証が完了し、次世代民間エンジンである PW1100G-JM へ適用した。高効率な高バイパスファン実現に不可欠な軽量化ファンの実用化は、運航コスト低減という顧客エアラインのニーズにこたえるものであり、今後開発されるエンジンにも幅広く採用されることが期待される。複合材



第 11 図 SGV フルリング試験  
Fig. 11 SGV full ring test



(提供: Pratt & Whitney 社)

第 12 図 PW1100G-JM および複合材ファンケース  
Fig. 12 PW1100G-JM and composite fan case



第 13 図 PW1100G-JM 複合材 SGV  
Fig. 13 PW1100G-JM composite SGV

ファンブレードについては実機適用を目指して引き続き開発を進めるとともに、ファンケース/SGV についてもさらなる軽量化を図っていく。

### — 謝 辞 —

本研究の一部は、「平成 19, 20 年度次世代航空機エンジン用構造部材創製・加工技術開発」として経済産業省の委託を受けた一般財団法人日本航空機エンジン協会との契約に基づき実施した成果である。

また、3.1 節の平板衝撃試験は九州工業大学 赤星保浩教授に、4.1 節のゼラチン衝撃試験は法政大学 新井和吉教授に依頼して実施した。本開発に当たっては関係各位および両研究室各位から多大なご指導とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。