

平成28年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

3D 繊維骨格を持つ耐熱 FRP を用いた
航空機ジェットエンジン用軽量化ブレードの開発

研究開発成果等報告書

平成29年5月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 学校法人 龍谷大学

目 次

| | |
|--|------------------|
| 第1章 研究開発の概要 | <u>4</u> |
| 1-1 研究開発の概要 | 4 |
| 1-2 研究開発の背景 | 5 |
| 1-2-1 背景 | 5 |
| 1-2-2 航空機エンジンの低燃費化 | 5 |
| 1-2-3 エンジン温度とブレードの耐熱性 | 5 |
| 1-3 当該分野における研究開発動向 | 7 |
| 1-3-1 航空機エンジンの軽量化 | 7 |
| 1-3-2 耐熱 FRP 成形用ポリイミド樹脂の問題点 | 7 |
| 1-3-3 問題点を克服した I.S.T 独自のポリイミド樹脂材料技術 | 8 |
| 1-3-4 I.S.T 独自のポリイミド樹脂「Skybond® RTM」と CFRP | 8 |
| 1-3-5 (株)島精機製作所の最先端立体編成技術「ホールガーメント®」 | 9 |
| 1-3-6 プリフォーム作製における炭素繊維の問題点 | 9 |
| 1-4 研究開発の目標 | 10 |
| 1-4-1 高度化目標ーア | 10 |
| 1-4-2 高度化目標ーイ | 10 |
| 1-4-3 対応する高度化目標 | 10 |
| 1-5 研究体制 | 10 |
| 1-5-1 履行体制図 | 10 |
| 1-5-2 管理員、研究員、補助員及びアドバイザー | 11 |
| 1-6 成果概要 | 12 |
| 1-7 当該研究開発の連絡窓口 | 12 |
| | |
| 第2章 本論 | <u>13</u> |
| 2-1 設計手法の開発とその実証 | 13 |
| 2-2 実際の運用を想定した解析シミュレーション評価 | 25 |
| 2-3 RTM 成形型設計技術の開発 | 26 |

| | | |
|-----------------|-------------------------|------------------|
| 2-4 | ポリイミド繊維の開発 | 27 |
| 2-4-1 | ポリイミド紡糸液の開発 | 27 |
| 2-4-2 | ポリイミド繊維の物性 | 28 |
| 2-5 | プリフォーム技術の開発 | 31 |
| 2-5-1 | 開発目標について | 31 |
| 2-5-2 | プリフォーム設計手法の開発 | 31 |
| 2-6 | RTM成形技術の開発 | 37 |
| 2-6-1 | プリフォームを用いたデサイジング工程の確立 | 37 |
| 2-6-2 | 製造安定性の高い短時間注入RTM成形工程の確立 | 38 |
| 第3章 全体総括 | | <u>41</u> |

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の概要

燃料費高騰と CO₂削減要求から、民間航空機の低燃費化の要求はますます厳しくなっている。このような環境の中で、航空機メーカーでは燃費向上のための技術開発競争が行なわれている。例えば、ボーイングやエアバスは、アルミ合金に替わり、軽くてかつ強いエポキシ樹脂を用いた CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 機体の開発により軽量化を行い、燃費の向上を図っている。

本研究開発では、軽量化の妨げの一つとなっているジェットエンジンに着目し、チタン合金製の圧縮機ブレードに替わる、耐熱 FRP (Fiber Reinforced Plastics) 製ブレードを開発する。開発品をエンジンの軽量化、燃費向上のための新技術、新製品として航空・宇宙産業を顧客 (川下産業) として事業化をめざす (図 1-1)。また、本技術はジェットエンジンのみならず発電用ガスタービンや蒸気タービンにも適用可能であり、軽量化や高効率化が期待でき、波及的な事業展開も可能である。

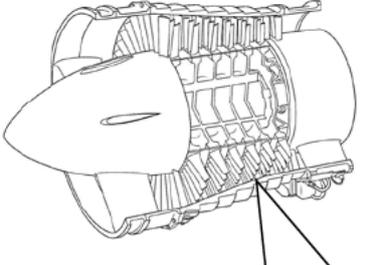
| | | |
|---|--|---|
| <p>◆ 従来技術</p> <p>材料 : チタン合金 比重 : 4.5 製造法 : 鍛造+切削加工</p> |  <p>圧縮機ブレード</p> | <p>◆ 新技術</p> <p>材料 : 耐熱 FRP 比重 : 1.5 製造法 : ホールガーマント法 + RTM 法</p> |
|  <p>チタン合金の従来ブレード</p> | | <p>ブレードの例 (ロールス・ロイス オリンパス BO1.1 の低圧部)</p> |
| <p>課題 :</p> <p>飛行機の機体はカーボン樹脂による軽量化が進んでいるがエンジンのブレード類はまだ金属性であり軽量化が進んでいない。</p> |  | <p>特徴 :</p> <p>本開発によるエンジンの圧縮機ブレードの材質は耐熱 FRP 製であり軽量化、燃費向上を図ることができる。</p> |

図 1-1. 航空機エンジンの圧縮機ブレード(動翼)

1-2 研究開発の背景

1-2-1 背景

航空機の低燃費化と機体の軽量化燃料費高騰と CO₂削減要求から、民間航空機の低燃費化の要求はいっそう厳しくなっている。ボーイングやエアバスは、比重 2.7 のアルミ合金に替わり、比重 1.5 と軽くてかつ強いエポキシ樹脂を用いた CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) を積極的に採用して盛んに機体の軽量化を図っている。話題のボーイング社の B787 では胴体、尾翼だけでなく最重要部の主翼にもその適用が拡大され、その総量は重量比で 50%にも及ぶ。次世代機ではさらなる CFRP の適用拡大が見込まれている (図 1-2)。

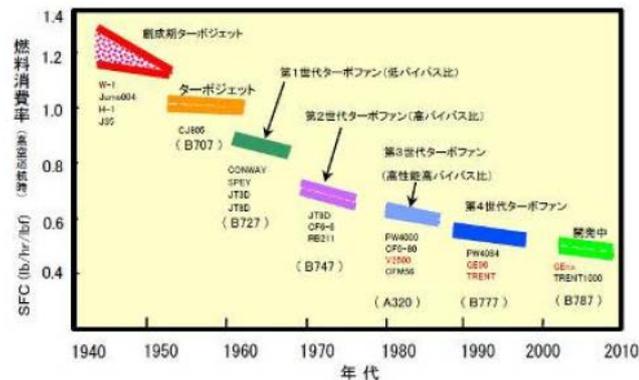


図 1-2. 航空機エンジンの燃費の変遷

1-2-2 航空機エンジンの低燃費化

また更に、航空機エンジンも、地球温暖化問題を背景に国際民間航空機関 (ICAO) が航空機エンジン自体に対する環境規制を強化しており、低燃費化 (図 1-2) が求められている。そのため、エンジンの軽量化による低燃費化も最も重要な課題の一つになる。

1-2-3 エンジン温度とブレードの耐熱性

航空機エンジンは、主にファン、圧縮機、燃焼器、タービンからなる (図 1-3)。今回のプロジェクトで開発を目論む圧縮機ブレードが位置する圧縮機の前段部分は 250°C 程度であり、関連部材は数千時間のフライトに耐える耐熱性、信頼性が必要である。

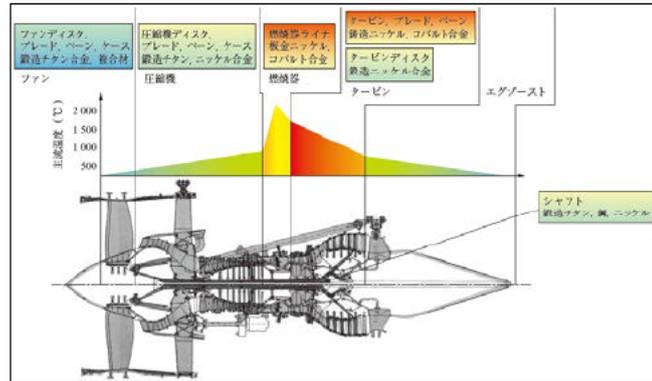


図 1-3. 航空機エンジンの模式図と主流温度 (IHI 技報 Vol. 53 No.4 (2013))

圧縮機ブレード用の材料として樹脂やアルミ合金の適用を考えると、エポキシ樹脂の CFRP は使用可能温度が百数十℃と低く、耐熱性が完全に不足している。一方、アルミ合金は低温では軽くて強いが 200℃以上になると急激に強度が落ち使用できない (図 1-4)。

このためエンジンは機体と比較して大幅に軽量化が遅れている。圧縮機の部品である 4~20cm 大のブレードも未だ比重 4.5 と重いチタン合金製 (図 1-5) となっており軽量化できていないのが実状である。また、チタン合金製ブレードは、鍛造・切削により生産され、その価格は 10~20 万円/個と高価格であることも課題の 1 つである。

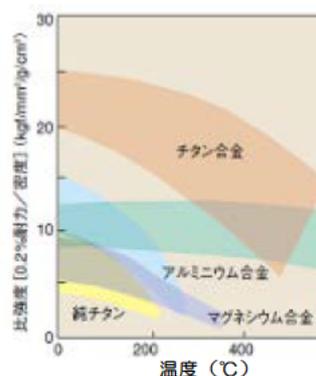


図 1-4. 各種材料の比強度 (神戸製鋼資料)



図 1-5. チタン合金製ブレード (IHI 技報 Vol.53 No.4 (2013))

1-3 当該分野における研究開発動向

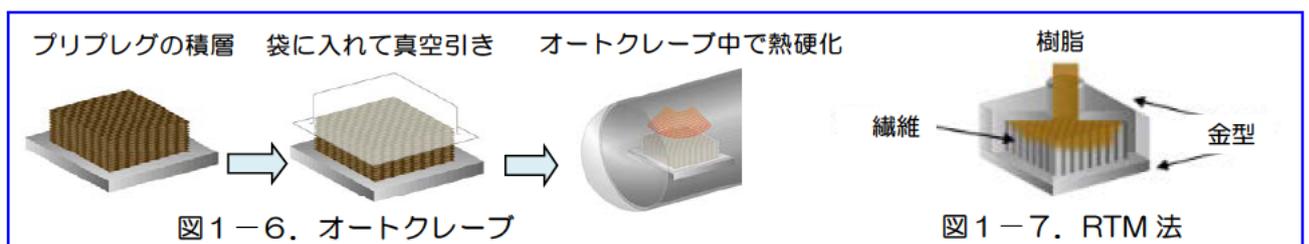
1-3-1 航空機エンジンの軽量化

本研究開発の目的は、航空機エンジンの軽量化を支える技術の一つとして、現在使用されている「チタン製圧縮機用ブレード」に替わる「耐熱 FRP 製ブレード」を株式会社島精機製作所（以下「(株)島精機製作所」という。）と(株)アイ.エス.テイ（以下「I.S.T」という。）のオリジナル技術を融合して新しく開発することにある。

一方でグローバルな視点から、現在のところ、大手の企業が進めている「複合材料による航空機エンジン用ブレードの研究開発」は「CFRP の適用によるファンブレード」の開発と「CMC の適用による高温タービン部品」の開発が主である。ファンブレードのコスト問題の解決が優先されていることや圧縮機が低圧部でも $\sim 300^{\circ}\text{C}$ と温度が高いため、圧縮機周辺の耐熱 FRP 化は現在のところ手付かずである。

1-3-2 耐熱 FRP 成形用ポリイミド樹脂の問題点

現在主流の FRP の成形は図 1-6 に示すオートクレープ法で行なわれ、手作業によって何層にもプリプレグを積層し真空引きした後、オートクレープ内で熱硬化することで FRP を成形する。この方法はコストが高いのが難点で、大型 FRP の成形に適用されるが、圧縮機ブレードのように小さな FRP 成形の場合、生地のカット・積層の手間により高コスト化に拍車がかかるという問題がある。



一方、FRP の低コスト成形法として RTM 法（図 1-7）が注目されている。RTM 法は、金型内に入れた繊維に樹脂を注入、熱硬化をする FRP の成形法で、圧縮機ブレードのような小さな FRP 成形に適している。型設計により高い寸法精度とより複雑な形状の FRP が得られる。しかし、耐熱性で知られるポリイミド樹脂は、その裏返しとして不溶不融であり RTM 法には本来適用できない。

1-3-3 問題点を克服した I.S.T 独自のポリイミド樹脂材料技術

米国航空宇宙局(NASA)は宇宙航空研究開発機構(JAXA)が発表した TriA-ポリイミドのコンセプトを基に、RTM 法に適用可能なポリイミド樹脂を開発し、宇部興産株式会社から「PETI-330」として販売されている。しかし、その分子設計は研究開発の域を脱しておらず高価格で民生用途への展開は難しい。これに対し、I.S.T は供給安定性の高い汎用原材料のみを使用し RTM 法に実用可能な価格競争力に優れたポリイミド樹脂「Skybond® RTM」を開発した(図1-8)。



図1-8. Skybond® RTM

1-3-4 I.S.T 独自のポリイミド樹脂「Skybond® RTM」とCFRP

「Skybond® RTM」は無溶剤のパウダー(図1-9)で、熔融可能な特徴を持ち、金型内に予め入れた強化繊維の構造体の隙間に容易に注入が可能である。注入後の熱架橋により高分子量化し、300°Cのガラス転移温度を有するポリイミド樹脂としての機械強度を発現する。「Skybond® RTM」と炭素繊維織物を用いてCFRP 平板の作製技術を確立した(図1-10)。そのCFRP はチタン合金よりも比強度が高く、FRP で最も重要な空隙率1%未満を達成している(図1-10)。

図1-9. 耐熱CFRP
(Skybond® RTM 使用)

図1-10. 耐熱FRPの断面

1-3-5 (株)島精機製作所の最先端立体編成技術「ホールガーメント®」

ニットウェアを製造する場合、前身頃、後身頃、袖といった別々のパーツを編んだ後で一緒に縫い合わせるのが通常の方法であるが、(株)島精機製作所のホールガーメント®技術は、一着丸ごとの状態で、独自に開発した横編機から直接、立体的に編成される革命的技術である。この技術はアパレルのみならず他の工業製品への応用展開可能な技術である(図1-11、図1-12)。



1-3-6 プリフォーム作製における炭素繊維の問題点

RTM 法によるブレードの成形は、製品の複雑な形状に即した繊維の骨組み(プリフォーム)が必要である。炭素繊維は優秀な工業用材料の一つであるが、炭素繊維をプリフォームの材料として使用する場合は、平面の織り物を作り裁断した後、型に手張りしプリフォームにする。ホールガーメント®技術を適用した立体編み物は、生地を作った時点でニアネットシェイプのプリフォームが出来上がるので生産コストの短縮に有効である。しかしながら、炭素繊維は曲げや摩擦に弱く、非常に折れやすい。このため、炭素繊維による編み物プリフォームの実現はきわめて難しい。そのため、炭素繊維に替えて、折れにくく曲げに強いポリイミド繊維の適用は、編み物プリフォーム実現に有効で、特に複雑な立体構造を持つプリフォームが折れない強度のある繊維一本で実現できるため、“ポリイミド繊維+ホールガーメント®”は極めて有効な技術になる。

本プロジェクトでは、この立体編成技術を応用してブレードの骨格になるブレード用プリフォーム編成技術(装置)を開発する。

1-4 研究開発の目標

1-4-1 高度化目標ーア

ジェットエンジンの軽量化による航空機の燃費向上を実現するため、軽量の耐熱 FRP 製のジェットエンジン用圧縮機ブレードを開発する。現在の圧縮機用ブレードは比重 4.5 のチタン合金製であるが、比重 1.5 の耐熱 FRP 製に置き換えることでエンジンの軽量化が可能である。したがって本開発では、耐熱温度 250℃以上、比重 1.5 の軽量化耐熱 FRP 製圧縮機ブレードを実現する。

1-4-2 高度化目標ーイ

上記圧縮ブレード実現のために、ブレードの骨組み構造を構成するための、【1】耐屈曲性ポリイミド強化繊維の開発と、ホールガーメント® 技術を基礎として、ブレードの骨組み構造を作製するための【2】強化繊維の 3 次元立体編成加工技術の開発、及び【3】RTM (Resin Transfer Molding) 法によるブレード成形技術の開発を行う。また、技術的な支えとして【4】ブレードの機械特性評価法の開発と強度の理論計算、開発品の製品としての方向性を間違わないための【5】顧客目線での製品評価とその対応も行なう。

1-4-3 対応する高度化目標

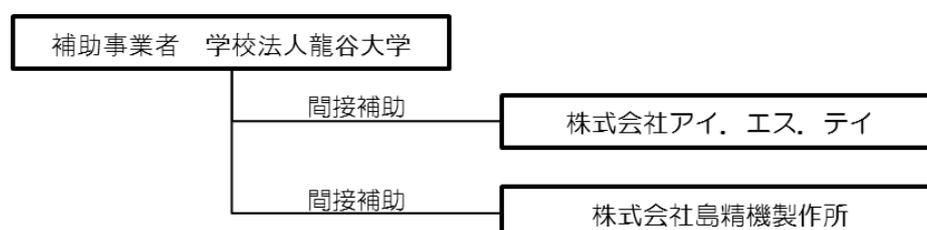
3) 航空宇宙分野に関する事項

② 高度化目標

ア. 構造部素材等の耐衝撃性等の高強度・高弾性率化、耐熱性・軽量化の向上
 イ. 複合用高性能繊維の織編加工技術、繊維と樹脂の複合化技術等、複合材料の成型技術の向上

1-5 研究体制

1-5-1 履行体制図



1-5-2 管理員、研究員、補助員及びアドバイザー（2017年3月17日時点）

【補助事業者】学校法人龍谷大学、管理員

| 氏名 | 所属・役職 | テーマ番号 |
|-----------------------------------|--|-------|
| 松山 幸司 筒井 長徳 栃木 紅美 富岡 友紀子 | 龍谷エクステンションセンター・課長 龍谷エクステンションセンター・産学連携コーディネーター 龍谷エクステンションセンター・課員 龍谷エクステンションセンター・課員 | |

同研究員

| 氏名 | 所属・役職 | テーマ番号 |
|-------|-------------------|-------|
| 辻上 哲也 | 理工学部 機械システム工学科・教授 | 【4、5】 |

同補助員

| 氏名 | 所属・役職 | テーマ番号 |
|-------|----------------|-------|
| 松田 晶子 | 龍谷エクステンションセンター | |

【間接補助事業者】株式会社アイ. エス. ティ、研究員

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容 テーマ番号 |
|--------|-------------|---------------|
| 森内 幸司 | 研究開発部 主席研究員 | 【1、3、5】 |
| 森島 克樹 | 研究開発部 | 【1、3、5】 |
| 中垣 龍太 | 研究開発部 技師補佐 | 【1、3、5】 |
| 上原 聡 | 研究開発部 部長代理 | 【1、3、5】 |
| 大庭 圭一朗 | 研究開発部 技師 | 【1、3、5】 |

【間接補助事業者】株式会社島精機製作所、研究員

| 氏名 | 所属・役職 | 実施内容 テーマ番号 |
|-------|-----------------------|---------------|
| 芦辺 伸介 | 営業統括部ホールガーマント販売チーム 係長 | 【2、5】 |
| 池中 政光 | 製造技術部 チーフアドバイザー | 【2、5】 |
| 宮本 昌紀 | メカトロ開発部第1グループ | 【2】 |
| 南 昌幸 | グラフィックシステム開発部 係長補 | 【2】 |
| 加納 克也 | 製造技術部 トータルサービスチーム | 【2】 |
| 弓場 功雄 | 製造技術部 トータルサービスチーム | 【2】 |

【アドバイザー】

| 氏名 | 所属 | テーマ番号 |
|-------|---------------------|-------|
| 北條 正弘 | 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 | |

1-6 成果概要

- 【1】耐屈曲性ポリイミド強化繊維を開発することができた。
- 【2】強化繊維の3次元立体編成加工技術を開発することができた。
- 【3】RTM法によるブレード成形技術を確立することができた。
- 【4】ブレードの機械特性評価法の開発と強度の理論計算を実施できた。
- 【5】目標比重1.5に対し1.58と若干重くなったものの、現行のチタン合金Ti-6Al-4V製ブレードに対し、本開発FRP製ブレードの適用により、剛性及び強度を相当以上に確保しつつ大幅な軽量化が実現可能なことを示唆することができた。
今後、エンジンメーカーにアピールしていく。

1-7 当該研究開発の連絡窓口

所属 : 株式会社アイ.エス.テイ
氏名 : 森内 幸司
電話 : 077-543-2211
ファックス : 077-543-1204
メール : moriuchi_koji@istcorp.jp

(事業管理機関の連絡窓口)

所属 : 龍谷大学 龍谷エクステンションセンター (REC)
電話 : 077-544-7299
ファックス : 077-543-7771
メール : rec@ad.ryukoku.ac.jp

第2章 本論

2-1 設計手法の開発とその実証

現実的な実証とするには、翼形状と回転力・空力などが実際に即して設定されている必要がある。これらの情報がすべて揃うものとして、短距離離着陸飛行実験機「飛鳥」用ファンエンジン高圧圧縮試験機 HC-20 の 1 段動翼の情報に基づき設定した。

また、評価支援機関である JAXA 回転強度試験機の試験ハブへの組み込みも考慮し、設計から実証試験までを行った。表 2-1 に、設定した基本諸元を示す。

表 2-1. ブレード設定諸元表

| | 項目 | 設定値 |
|----|-------------|--------------------------|
| 1 | 翼長 | 115 mm |
| 2 | 翼幅 | 40 mm |
| 3 | 全長（固定部含む） | 160 mm |
| 4 | 翼形 1（固定側） | 二重円弧翼、反り角 20.3°、厚み比 0.08 |
| 5 | 翼形 2（先端） | 二重円弧翼、反り角 20.3°、厚み比 0.06 |
| 6 | 前・後縁半径 | 0.25 mm |
| 7 | 喰い違い角（固定部） | 41.1° |
| 8 | 翼振り角 | -10° |
| 9 | センターハブ直径 | Φ200 mm |
| 10 | 回転速度 | 13200 rpm |
| 11 | 空気流量 | 19 kg/s |
| 12 | 翼枚数 | 36 枚 |
| 13 | 1 段動翼平均軸流速度 | 165 m/s |
| 14 | 動翼から見た流入角 | 23.2° ~ 32.1° |
| 15 | 動翼から見た流出角 | 15.2° ~ 53.0° |

空力荷重は、JAXA 指導の下、古典的な流体力学の式を用いて算出した。

$$F = \frac{m}{n} \times (\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2)$$

図 2-1 より (1)

$$\frac{s}{V_a} = \tan \alpha_1 + \tan \beta_1 \quad (2)$$

$$\frac{s}{V_a} = \tan \alpha_2 + \tan \beta_2 \quad (3)$$

$$\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2 = \tan \beta_2 - \tan \beta_1 \quad (4)$$

さらに式 (4) を変形すると式 (1) は、

$$F = \frac{m}{n} \times (\tan \beta_2 - \tan \beta_1) \quad (5)$$

空気流量 m [kg/s]、翼枚数 n 、軸流速度 V_a 、動翼から見た流入角 β_1 、動翼から見た流出角 β_2

となる。

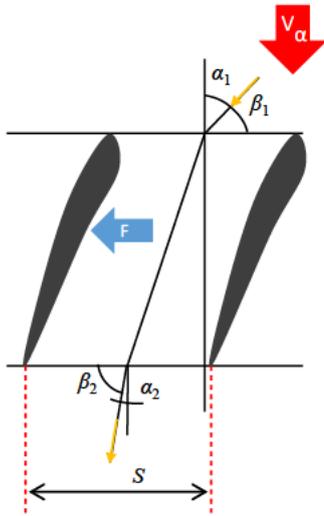


図2-1. 動翼が受ける力

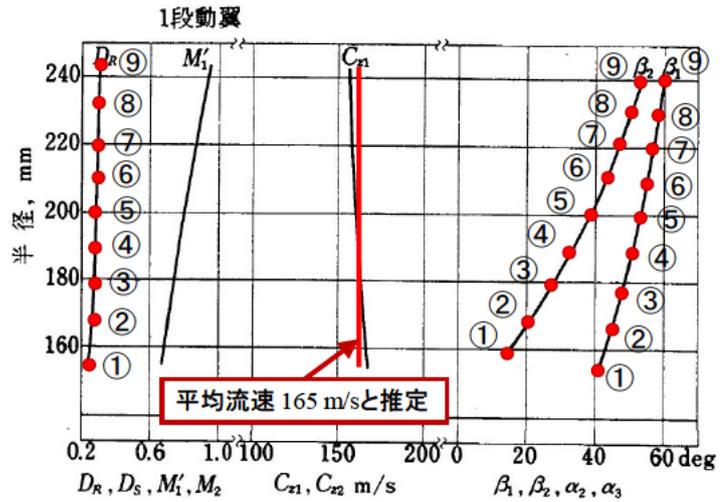


図2-2. 1段動力流れ分布図 (JAXA 資料より)

空力は外周ほど大きくなるため、8等配した各エリアで計算し (図2-2)、各々のエリア内で算出荷重を翼面に圧力換算したものを負荷した (図2-3)。

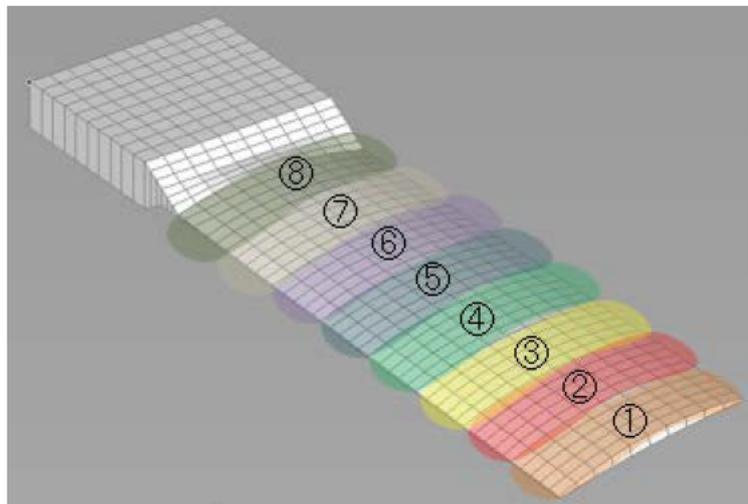


図2-3. 解析モデルへの翼面荷重 (圧力換算) 設定

プリフォームの開発の途中段階において、下記①、②の理由で補助事業期間内の達成（図2-4）が困難と判断されたことから、ブレード設定諸元の一部を実現可能な製造制約範囲で設計変更している。

- ① ブレードは長手・短手の2方向で同時の徐変肉厚を要求しているが、期間内での2方向同時変肉のプリフォーム開発は達成できなかった。
- ② 最薄部は表2-1、ブレード諸元表項目6の前・後縁半径の R0.25mm から 0.5 mm となるが、期間内でのプリフォームは 1.0 mm が最薄厚みの限界だった。

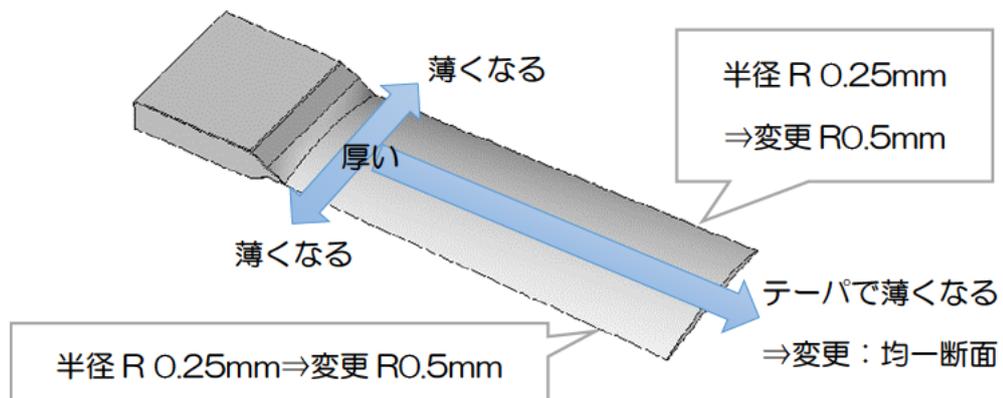


図2-4. ブレードの2方向同時徐変肉厚と最薄の前・後縁の変更

したがって、徐変肉厚は翼形状の形成から短手方向を優先し、固定部側からの均一断面に設計変更した（先端側質量が増加するので荷重条件としては厳しくなる）。

また実現可能な最薄部 1 mm に合わせて、前・後縁半径を R 0.5mm に変更した。変更したブレード設定諸元を表2-2に示す

表2-2. ブレード設定諸元の変更内容

| | 項目 | 設定値 |
|---|---------|--------------------------|
| 5 | 翼形2（先端） | 二重円弧翼、反り角 20.3°、厚み比 0.08 |
| 6 | 前・後縁半径 | 0.5 mm |

FEM 解析ソフトウェアとして Femap with NX Nastran、要素には積層ソリッド要素を用い、異方性を取り扱うために材料座標系を設定した。また、必要な各要素試験を実施し、実際に近い材料物性定義を行った。

得た物性値に基づき、運用を想定した拘束荷重設定にてブレード形状の材料構成について FEM 解析を用いて最適化を行った結果、表 2-3 の構成でチタン合金 (Ti-6Al-4V) ブレードを上回る剛性・強度に達する結果を算出し、プリフォーム開発の目標値としてアウトプットを行った。

表 2-3. プリフォーム構成の最適化結果 (全繊維体積含有率 55%)

| | 項目 | 材料 | 比率 (全繊維 100%) |
|---|--------|-------------|---------------|
| 1 | 0° 配向 | トシカ M46JB ※ | 50% |
| 2 | 角度配向 | トシカ M46JB ※ | 40% |
| 3 | 90° 配向 | ポリイミド繊維 | 10% |

(※入手性を優先した選定、解析上は中弾性 PAN 系炭素繊維以上の適用で成立)

プリフォームの開発に対しても編成素地の段階から、成形・試験片製作・破壊試験・剛性及び強度評価を繰り返し支援した結果、ブレードとして FEM 解析上、適用可能な多軸編地の完成に至る。

FEM 解析による破壊評価には、Hoffman 則を用いた。

$$F = \frac{\sigma_L^2}{F_L^t F_L^c} - \frac{\sigma_L \sigma_T}{F_L^t F_L^c} + \frac{\sigma_2^2}{F_T^t F_T^c} + \left(\frac{1}{F_L^t} - \frac{1}{F_L^c} \right) \sigma_L$$

$$+ \left(\frac{1}{F_T^t} - \frac{1}{F_T^c} \right) \sigma_2 + \left(\frac{\sigma_{LT}}{F_{LT}} \right)^2$$

L 方向の応力 σ_L , T 方向の応力 σ_T , LT せん断力 σ_{LT} , L 方向の引張強度 F_{LT} , L 方向の圧縮強度 F_{Lc} ,
 T 方向の引張強度 F_{Tt} , T 方向の圧縮強度 F_{Tc} , LT せん断強度 F_{LT}

上式にて導出される無次元の値は F 値と呼ばれ、この F 値が 1 を超えたときに破壊が発生すると定義している。

引張破壊試験の設備には INSTRON 社製 5800R 万能試験機 (100 kN ロードセル) (図 2-5) と動ひずみ測定器に東京測器社製 DA17A を用いて、出力をデータロガーに同時収録した。

試験片はプリフォーム用編地の製造制約から ASTM D3039M を参考にした独自規格を設定した（図2-6）。また、引張速度はすべての試験共通で 1 mm/分に設定した。



図2-5. 万能試験機

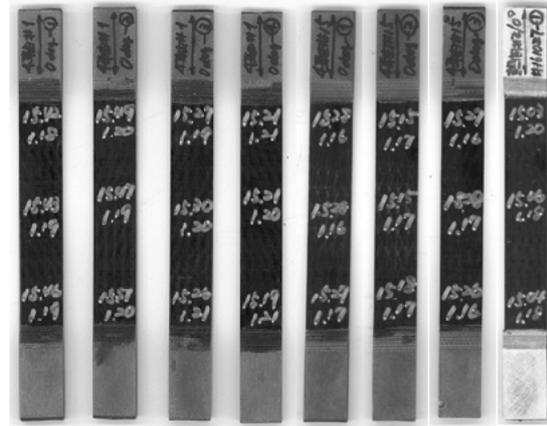


図2-6. プリフォーム用多軸編地試験片

プリフォームの基本構成となる多軸編地について、ブレードの強度評価となる引張破壊試験を行い、試験結果と FEM 解析の検証を行ったところ、単純に 0° 層または角度層のいずれかの F 値が 1 に達する FEM 解析予測では、破断荷重を実際よりかなり大きく算出していることが分かった。

また、このとき Hoffman 則を用いた各層評価を行うと、 90° 層の F 値は 4 を超えた値を示しており、すでに破壊してしまっていることも分かった。

ここで破壊挙動の非線形性を考慮し、 90° 層が $F=1$ に達した時点がこの層の破壊とする。但し、他の層は問題なくつながっていることから 90° 層のみ剛性が無くなったものとして再設定すると、他の 0° 及び角度層に応力が分散し急激に F 値が上昇する解析結果となることが分かった。

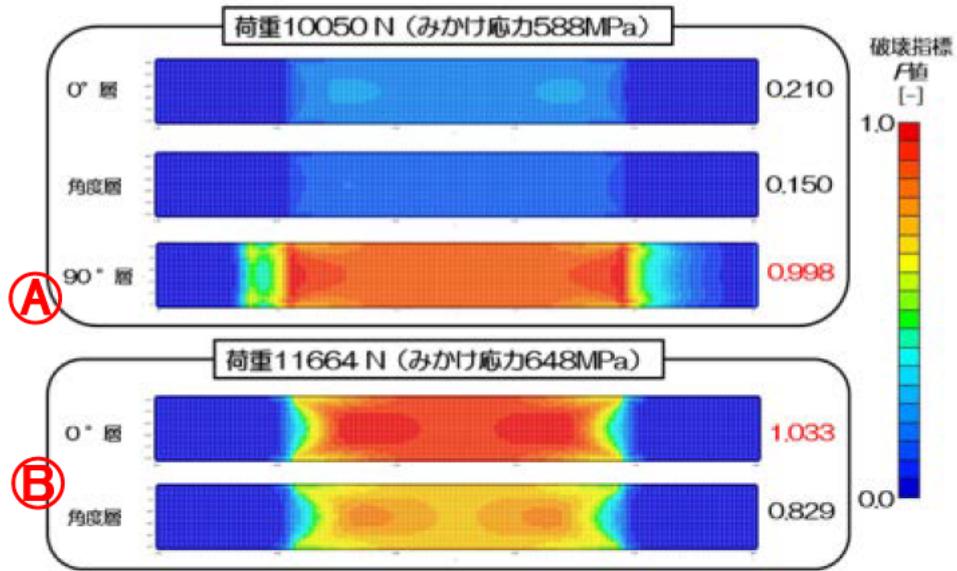


図2-7. 90°層破壊後再設定した0°及び角度層のF値解析結果

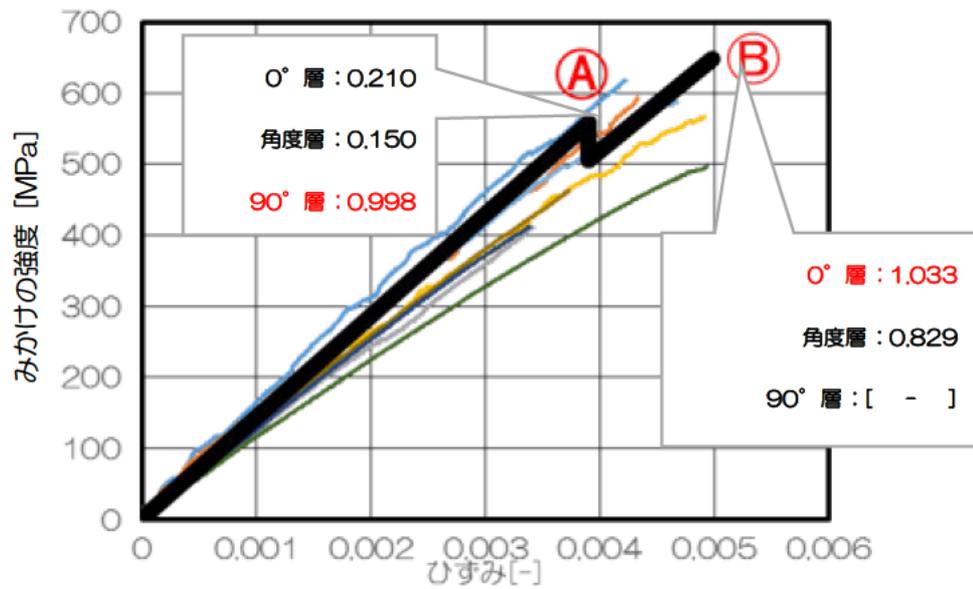


図2-8. 試験結果との合致性検証結果 (黒実線が解析値)

図2-7のように90°層破壊後の再設定による非線形性を考慮する解析を行うことにより、図2-8に示す解析値がやや高めながら実試験結果との合致が確認された。

基本構成の多軸編地については、250℃高温引張破壊試験も実施した。図2-9、図2-10に弾性係数、強度の結果を示す。

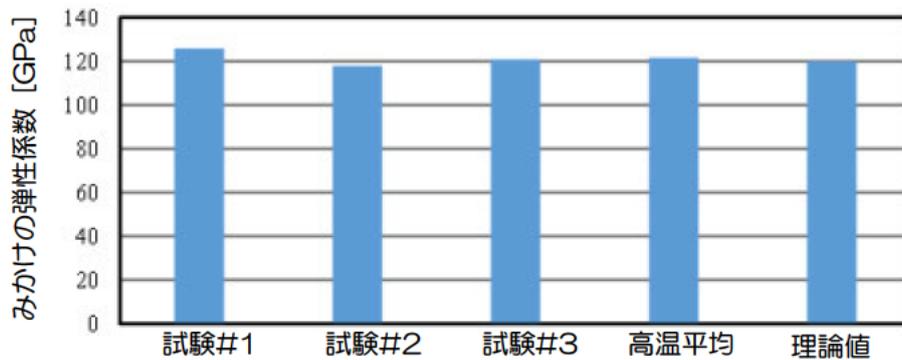


図2-9. 250℃高温引張試験結果（弾性係数）

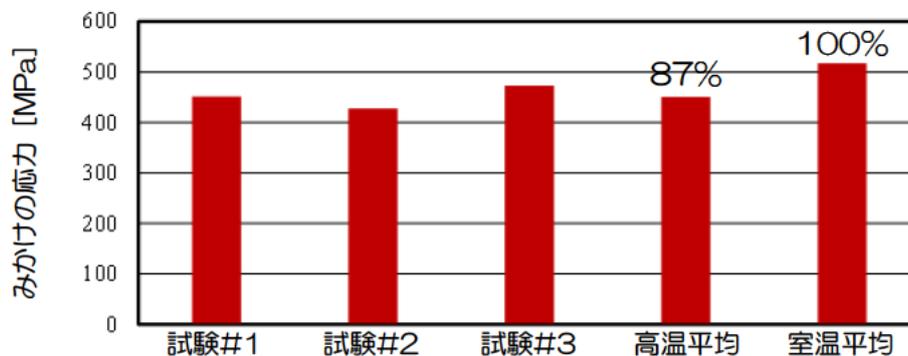


図2-10. 250℃高温引張試験結果（強度）

弾性係数は、図2-9のとおり、理論値と差がほぼ無く、高温環境における低下影響は認められないことから、弾性係数は高温時も維持とした。一方、強度は、図2-10のとおり、250℃高温では低下が認められ、試験結果から87%に低下するものとして設計・解析に反映させることにした。

ブレード形状については、実際の回転試験のハブ固定を治具製作して模擬した上、先端を増厚タブで補強、室温と250℃高温での引張破壊試験を実施した（図2-11～14）。



図2-11. ブレード引張破壊試験供試体

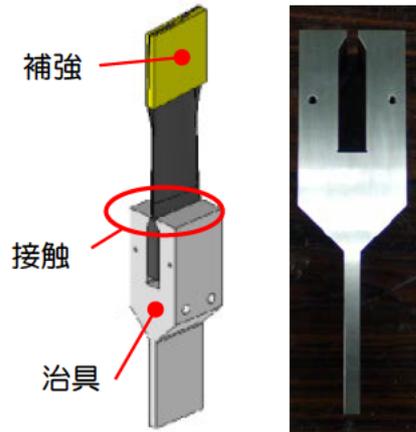


図2-12. 試験の固定概略とハブ固定模擬治具



図2-13. 室温試験状態

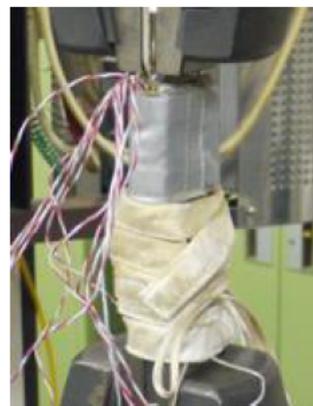


図2-14. 高温試験状態

また併行して、250℃高温で剛性は維持、強度は 87%に低下を見込み、前述の非線形を考慮した FEM 解析手法に基づいてブレードの引張破壊試験を模擬した解析も行った (図2-15)。

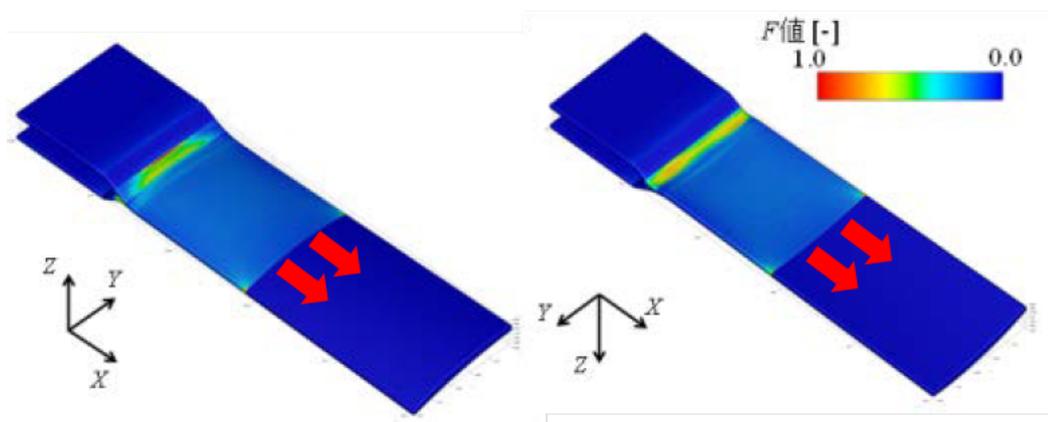


図2-15. ブレードの引張破壊試験を模擬した解析結果

その結果、F 値が 1 となる引張荷重 23,700 N を破壊荷重と予測した。

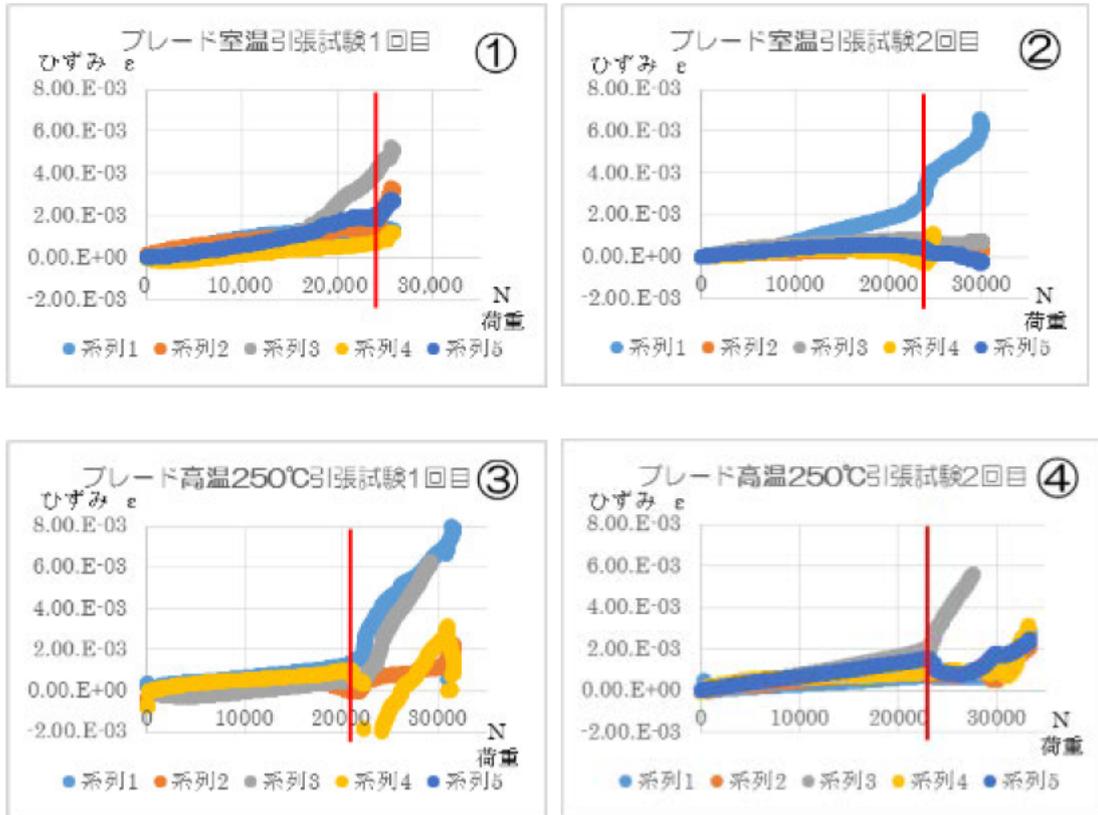


図2-16. ブレードの引張破壊試験結果

ブレード引張破壊試験結果でも、取り付けた複数のひずみデータから線形と非線形の領域が図2-16のとおり確認され、線形領域最大値を読み取ると表2-4のように整理される。

表2-4. ブレードの引張破壊試験結果（線形領域の最大荷重）

| | 室温 | 250℃高温 |
|---------|--------|--------|
| 1回目 [N] | 24,000 | 22,000 |
| 2回目 [N] | 24,000 | 23,000 |
| 平均 [N] | 24,000 | 22,500 |
| 平均比較 | 100% | 94% |

ブレードの引張破壊試験について、非線形性を考慮したFEM解析結果と実際の試験結果の比較検証を行うと、図2-17のようになり、5%ほど解析が高めに出るものの、良好な合致性が確認された。

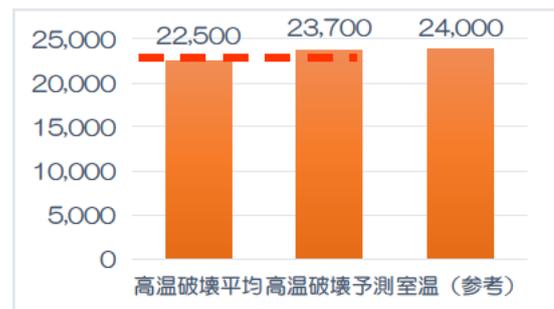


図2-17. ブレード引張線形最大荷重

表2-5に、ブレード引張破壊試験結果（破断）についてまとめた。完全な最終破断荷重では250℃高温環境の方が室温より明らかに高い逆転現象が認められた。

表2-5. ブレード引張破壊試験結果（破断）

| | 室温 | 250℃高温 |
|---------|--------|--------|
| 1回目 [N] | 25,800 | 31,700 |
| 2回目 [N] | 30,000 | 33,400 |
| 平均 [N] | 27,900 | 32,550 |
| 平均比較 | 100% | 117% |

これは本研究開発を含め、I.S.T の各要素試験実績でも過去に前例がなく、本研究開発の中での原因説明はできなかった（線形領域最大値を現実的な破壊と評価する本手法においては評価対象外範囲の事象である）。

ブレード形状については、JAXA の試験支援により実際の運用により近い高速回転試験も実施している。引張では両端固定・一様荷重になってしまうが、実際のエンジン運用同様の片端固定片端自由・累積荷重が模擬される。但し真空中の試験のため空力荷重及び熱は作用していない。

高速回転試験のブレード供試体には図2-18のようにひずみゲージを取り付け、試験装置のスリップリングを介して回転中の複数のひずみデータを取得した（図2-20）。

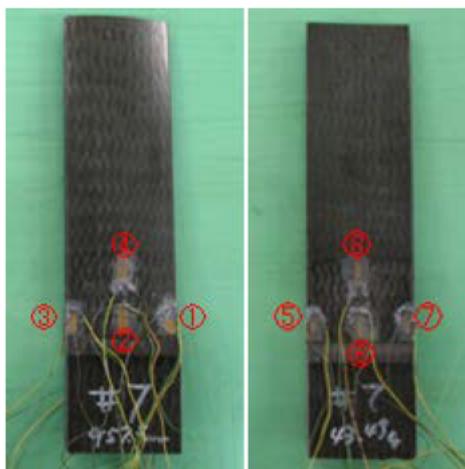


図2-18. 高速回転試験用供試体



図2-19. 試験装置への組み込み状態

ここでも同様に、高速回転試験を模擬した FEM 解析を実施し、ひずみゲージ取付位置のひずみを算出した（図2-21）。

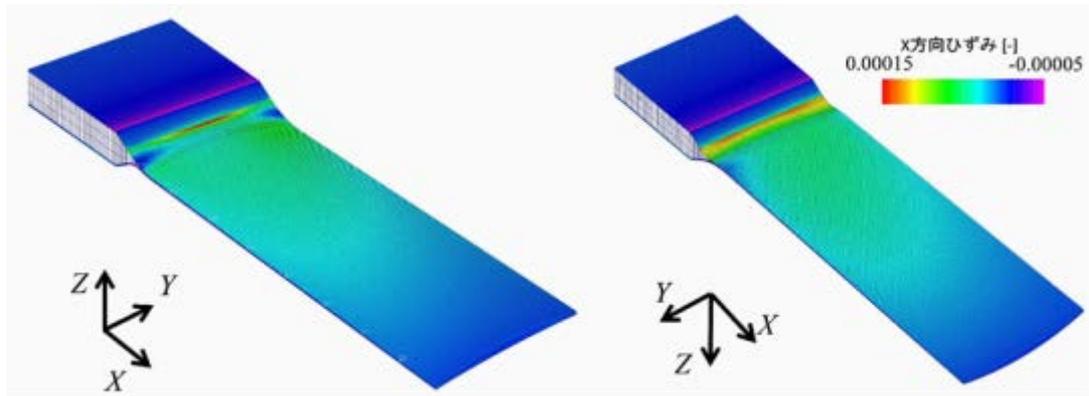


図2-20. 長手方向ひずみ解析結果例（13,200 rpm 時）

図2-21に、FEM 解析によるひずみ算出値と実際の回転試験結果との比較検証結果を示す。

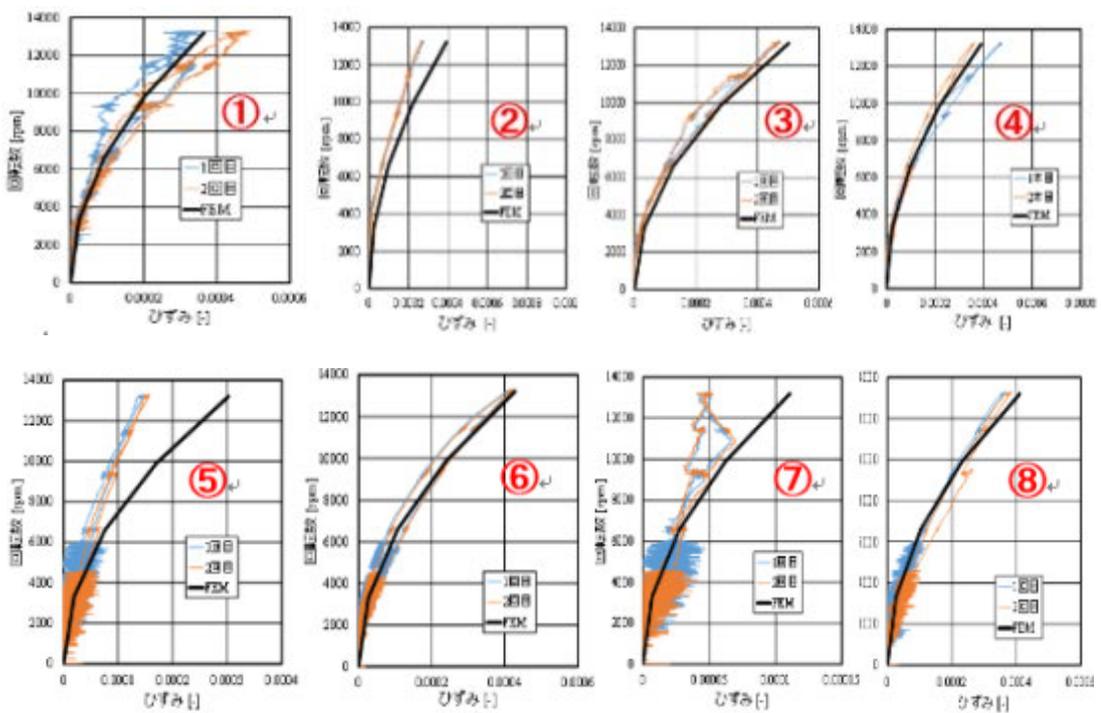


図2-21. 高速回転試験取得ひずみとFEM解析ひずみの比較（黒実線が解析値）

図2-22に、最高回転 13,200 rpm 時のひずみと FEM 解析ひずみを示す。

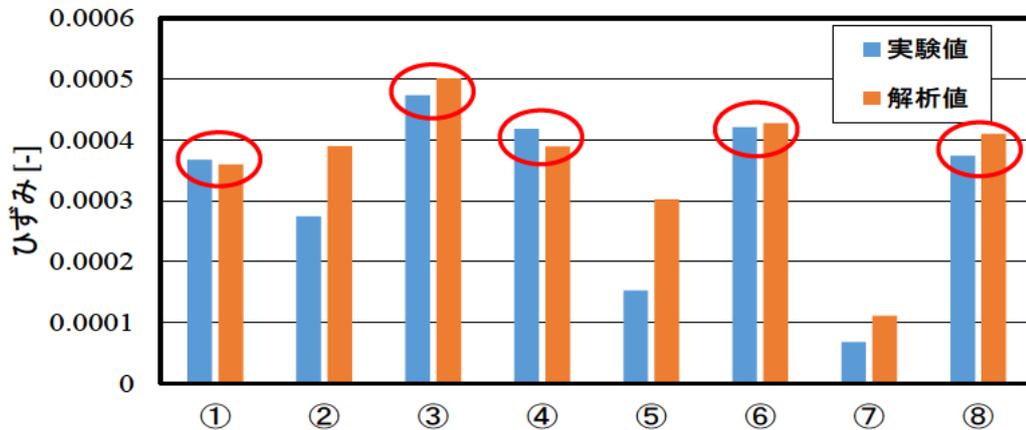


図2-22. 13,200rpm 時のひずみ（実験値）と FEM 解析ひずみ（解析値）

本解析モデル設定による解析結果は、特に実測ひずみが大きく出る位置では高い合致性を示すことが確認された。

本研究の設計手法の開発とその実証の結言として、各要素試験から物性設定値を特定し、非線形性を考慮した FEM 解析を用いて行う本設計手法は、ブレードの引張破壊試験及び高速回転試験ともに応力とひずみについての良好な合致が認められることから、設計手法として妥当（有用）であると判断できる。

またこれは同時に、設計された通りのプリフォーム RTM 製造が実現された実証でもあると言える。

現状では実際よりやや解析結果が高いため、解析手法並びに製造技術とも更なる精度アップによる合致性の向上が、今後の技術課題である。実用上は完全破断が評価基準にはならないと考えられるが、高温時の破断強度逆転現象は今回実施した試験範疇では原因不明であり、この解明については今後の学術的な技術課題と考えられる。

2-2 実際の運用を想定した解析シミュレーション評価

実証試験の実施自体が困難な 250℃環境下における 13,200 rpm 回転時に空力荷重が負荷される実際のブレード運用状況については、前述2-1の検証を経て妥当と判断した本 FEM 解析手法を用いたシミュレーションで評価を行った（図2-23）。

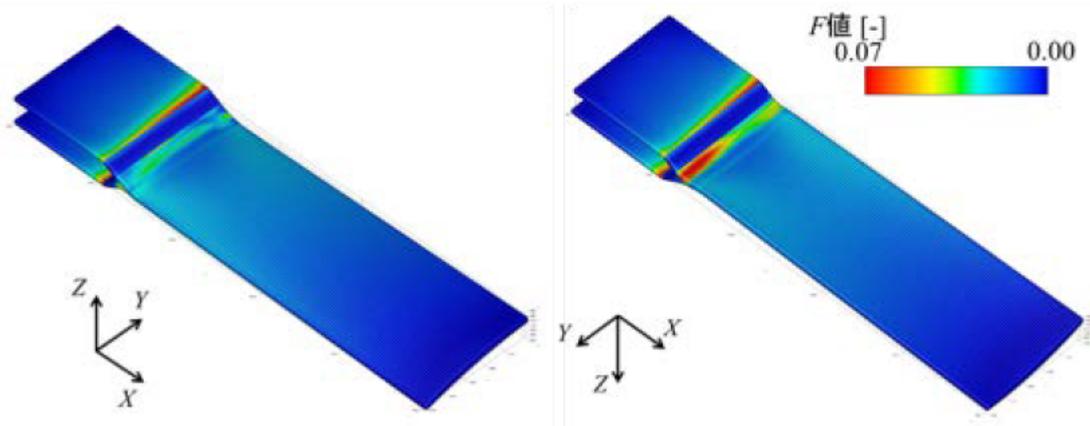


図2-23. 運用環境設定で解析されたブレードのF値分布

FEM 解析結果から算出された Hoffman 則の F 値は $0.07 \ll 1$ であり、ブレードは実際の運用環境においても十分に安全な範疇にあると判断できる。

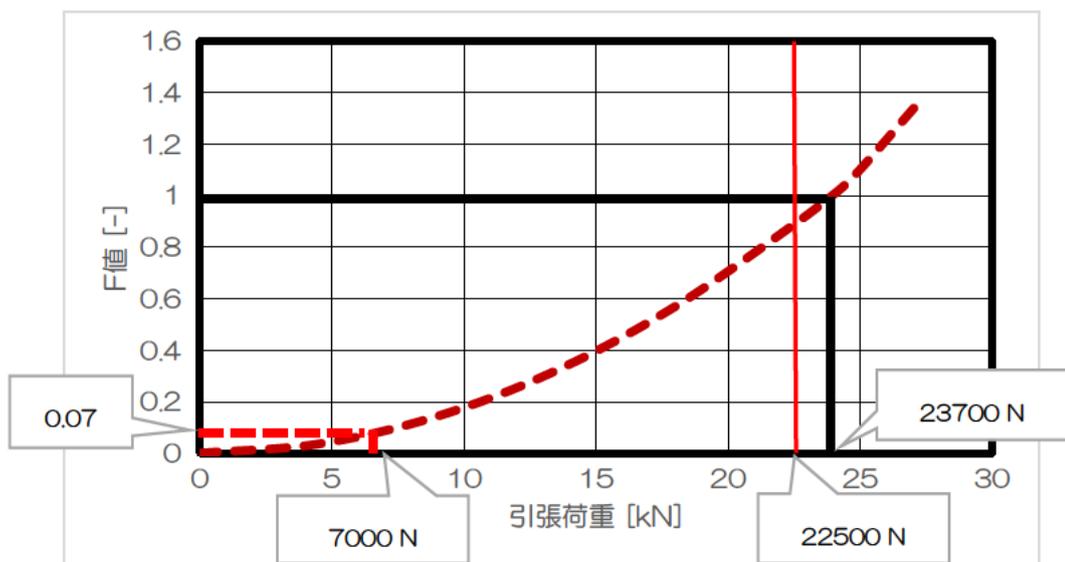


図2-24. 引張破壊試験実績を利用した安全係数算定

実施済みの高温引張破壊試験とその解析の実績を利用し、金属材料と比較可能な安全係数の算定を行った（図2-24）。引張試験を検証した解析での F 値曲線から 0.07 に相当する荷重は 7,000 N である。高温時の実際のブレードの線形最大荷重平均は 22,500 N であったことから、安全側にこれを破壊判断基準として用いると、安全係数 f として、

$$f = 22500 / 7000 = 3.2 [-]$$

が実質的に確保できているものと推定される。

表2-6にブレードの運用環境におけるシミュレーション結果のまとめを示す。

表2-6. 250℃環境下 13,200rpm 回転時に空力荷重負荷のブレード運用解析結果

| 最大変位[mm] | 最大捻れ角[°] | F 値[-] | 換算安全係数[-] |
|----------|----------|--------|-----------|
| 1.53 | 0.60 | 0.07 | 3.21 |

2-3 成形型設計技術の開発成果

3次元形状の RTM 成形に対し、事前の可視化実験を行い問題点や効果の確認を図った。室温での目視を可能とするため、型材の上下面に透明アクリル樹脂を用い、樹脂はエポキシ樹脂で代用した。

上述で内部の樹脂流れの状態が目視できるようになった結果、内部樹脂流れでは重力影響が無視できないことが確認された。縦置きでの注入では重力の影響から下側が上側より速く流れ、排出口に先行して到達することから、図2-25の赤丸部分に気泡を残留させやすく、これが成形不具合（ポイド）となる可能性が高いことが推察できた。



図2-25. 可視化実験用成形型セット



図2-26. 可視化実験風景

そこで成形型を横置き配置することによって、上下の流速差は無くなり不具合の原因となる広域な気泡残留が回避できることが事前に確認された。

また拡散して残留する極小さな気泡は、加圧 1 MPa 前後で完全消失することも目視できており、加圧成形の有用性も再確認できた。

これらの可視化実験による結果を反映させ、最適に設計・製作した本開発のブレード成形型は、実際のポリイミド樹脂 SKYBOND® RTM（品番：8000）によるブレード形状 250℃高温 RTM 成形においても、しっかりとその効果を発揮し、条件出し終了後の合計 9 回の成形中に不具合の発生は無かった。

2-4 ポリイミド繊維の開発

2-4-1 ポリイミド紡糸液の開発

一般的なポリイミドとして、ポリイミドA（図2-28）、B、・・・、H、Iの9種類のポリイミド組成からポリイミド紡糸液の作製を検討した。その結果、ポリイミドE（図示せず。）紡糸液から作製されたポリイミド繊維で最高強度が得られた。

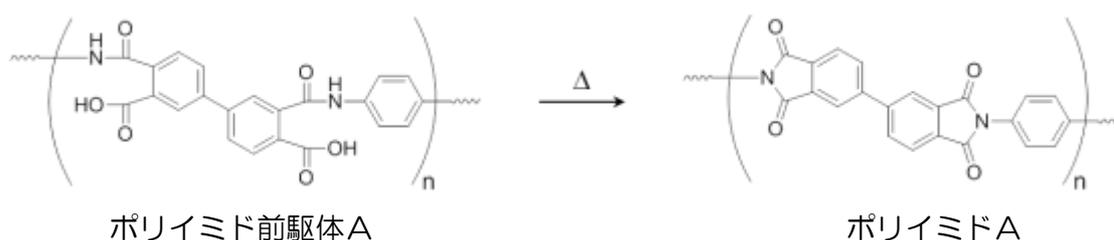


図2-28 ポリイミドAの組成

なお、いずれの組成においても、紡糸の困難さを解消するために、本研究開発で選定した紡糸助剤を添加し反応させることでポリイミド紡糸液としている。また、ポリイミド繊維の高強度化を発現させるために、10~20%濃度のポリイミド紡糸液において、少なくとも粘度が1,000 ポイズ以上となるように高分子量化を図った上での結果である。当該技術は国内特許出願を行い、国内優先権出願及び外国出願も行った。

2-4-2 ポリイミド繊維の物性

ポリイミドE組成からなるポリイミド紡糸液を用いて鋭意検討した結果、下記物性のポリイミド繊維（図2-29）を得た。



図2-29 ポリイミド繊維

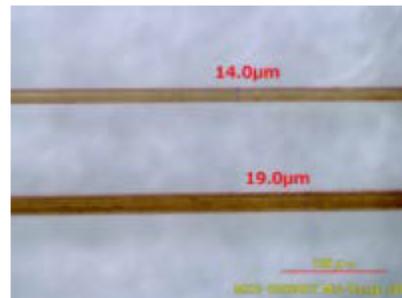


図2-30 ポリイミド繊維の直径

(1) 繊維径

図2-30のとおり、 $20\mu\text{m}$ 未満となる約 $19\mu\text{m}$ の繊維径を得ることができた。約 $14\mu\text{m}$ の繊維径については、その連続紡糸、連続生産に課題が散見されたため、本研究開発では、約 $19\mu\text{m}$ の繊維径のポリイミド繊維を使用した。

(2) ガラス転移温度

ガラス転移温度は、セイコーインスツルメント製の動的粘弾性装置 DM6100 を用いて、振幅 98 mN 、周波数 1.0 Hz の正弦荷重をかけ、 $2^\circ\text{C}/\text{分}$ の昇温速度の過程における損失弾性率を求めることにより測定した（図2-31）。ガラス転移温度は、 354°C であった。

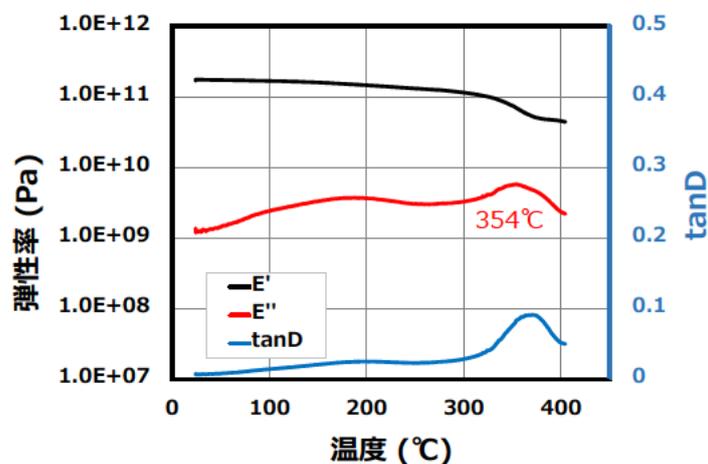


図2-31 動的粘弾性測定（損失弾性率：赤線カーブ）

(3) 比重

比重は、トルエン及び四塩化炭素を用いた浮沈法により測定した。測定は 25℃で行った。比重は、1.50 であった。

(4) 引張物性

(織度)

織度は、サーチ製オートパイプロ式織度測定器 (DC21) を用いて測定した。単糸織度は平均で4.0 dtex であった。

(引張物性)

引張物性は、島津製作所製小型卓上試験機 (EZ-SX 50N) を用いて、「JIS 7607」に準拠した方法で測定した。引張物性の平均は、引張強度が2.4 GPa (16 cN/dtex)、伸び率が2.0 %、弾性率が120 GPa (800 cN/dtex) であった(図2-32)。

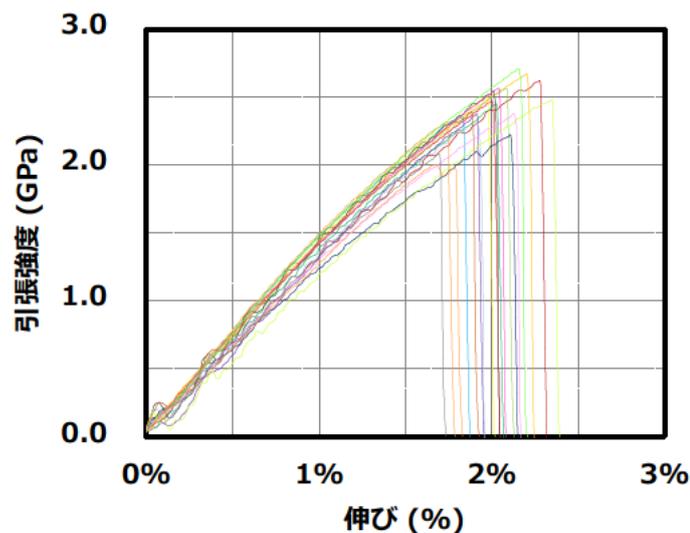


図2-32 引張物性 (20本測定結果)

(5) 熱膨張率

ポリイミド繊維の熱膨張率は、島津製作所製熱機械分析装置 (TMA-60) を用いて、下記の条件で2回測定し、2回目の測定における温度 100℃から 200℃の膨張率を、熱膨張率 (ppm/K) とした (図2-33)。熱膨張率は、-6.6 ppm/K (25-150℃) および-7.5 ppm/K (25-250℃) であった。

(1回目の測定)

測定温度範囲：40℃–350℃
 昇温速度：10℃/分
 荷重：2.0 g

(2回目の測定操作)

測定温度範囲：40℃–350℃
 昇温速度：5℃/分
 荷重：2.0 g

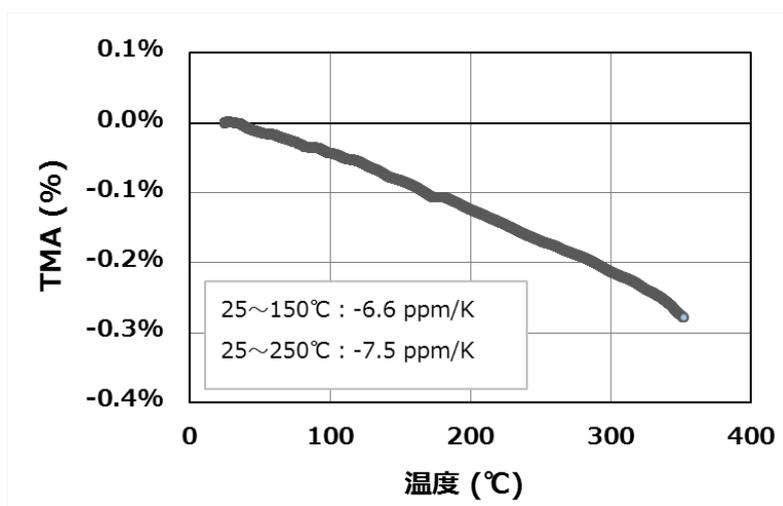


図2-33 熱膨張率測定結果

(6) 強度保持率

ポリイミド繊維を、250℃又は 300℃にした管状炉内で、測定対象物（得られたポリイミド繊維）を無張力下で 100 時間保持した。100 時間保持後の引張強度を測定した。そして、保持前の引張強度に対する 100 時間保持後の引張強度の割合を、引張強度保持率（%）として求めた。300℃における100時間後の引張強度保持率は93 % であった。

(7) 平衡水分率

ポリイミド繊維を、温度 24℃、相対湿度 55%の条件下で 48 時間放置した後、平衡に達したポリイミド繊維の水分量をカールフィッシャー法で測定し、平衡水分率を求めた。平衡水分率は、0.7%であった。

2-5 プリフォーム化技術の開発

2-5-1 開発目標について

一体型プリフォーム製造において最初に次の目標を設定した。
ホールガーメント®技術を応用して繊維骨格の高密度化、3次元立体編成技術を開発し、ブレード形状に即した立体加工繊維（プリフォーム）を一体編成する。

(1) 高密度編物の基礎技術の開発

編地に含まれる強化繊維の密度が強度に大きく依存することから、編成により得られた編地の非圧縮状態状況化での繊維空間密度を30%とすることを目標とする。

(2) 高密度編物機械の設計・開発

90~120 cm幅が編成可能でブレードプリフォーム1個が30分で生産できる機械を開発する。

2-5-2 プリフォーム設計手法の開発

(1) 強化繊維を用いてニット（編物）で一体成形の検討

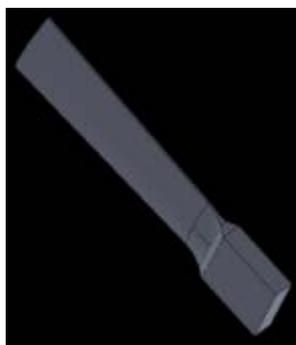


図2-34 ブレード 3Dモデル

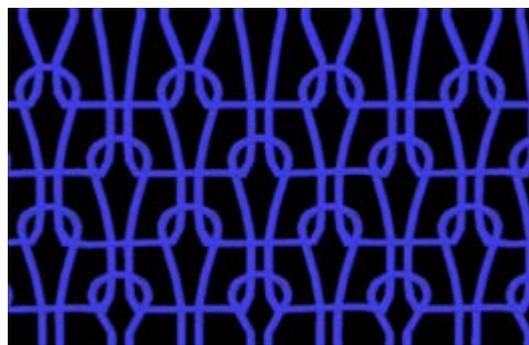


図2-35 ニット組織の例（インターロック組織）

図2-34に示されるようなブレードの3Dモデルからニットへの置き換えを実施する際に懸念されることは図2-35に示されるようなニットループ（編み目）による高い伸縮性により目的とするFRPとしての強度を保てないことである。龍谷大学によるブレードモデルシミュレーションにより、強化繊維を直線的に配置することで目的のブレード強度を発現させる必要があることが判明した。その為、強化繊維の直線配向を優先事項としてプリフォームを設計することとなった。

(2) 強化繊維の構成について

まずはプリフォーム設計において、龍谷大学によるシミュレーション結果に基づき、強化繊維の構成について図 2-36 のように策定した。

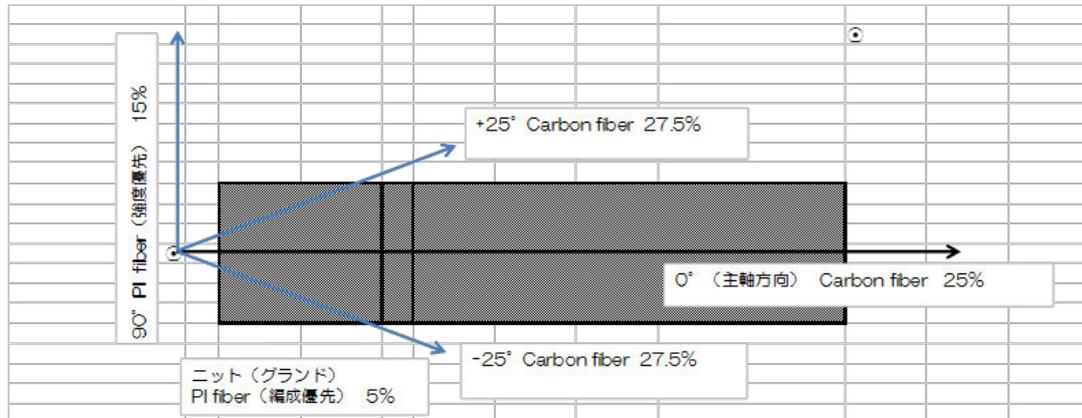


図 2-36 ブレードにおける各強化繊維の割合と繊維挿入方向

しかしポリイミド系でのニット（ループ形成）※1を試みたが、期間内に安定した編成を編機調整、素材改良の両面から達成することは出来なかった。したがって更に繊維構成を再検討することになり最終的に表 2-7 のような構成にすることが決定された。

表 2-7 使用する繊維とその割合 ※2 24K ⇒12K を2本使用

| 配向 | 材料 | 織度 | 繊維体積割合 |
|------|-----------|-------|--------|
| 0° | トシカ M46JB | 24K※2 | 40% |
| +25° | トシカ M46JB | 12K | 25% |
| -25° | トシカ M46JB | 12K | 25% |
| 90° | ポリイミド繊維 | 500d | 10% |

その結果、この繊維割合で4軸挿入生地を製作できる様、編機の改良を行うこととなった。なおニット（グラウンド）系としてはポリエステル 150d を使用した。

※1 ポリイミド系のニットループ形成の可能性について編機を用い試験を行った。

ポリイミド系は必要強度を達成しているが、横編機で編成するにはやや捲縮性が不足しており安定したループを形成することが難しかった。よってループを形成しない挿入という形で再検討した。今後は糸特性の改良によりループ形成に適したものにできる可能性は高い。

(3) 編機の改良について

編機は（株）島精機製作所製のものを使用して経系および緯系、更にバイアス方向にも挿入できるよう給糸部分の改良を施した。また編地作成においてプログラムをデザインシステムで作成するが、新たに給糸部の制御を行える様、ソフトウェア改良を実施した。

(4) 強化繊維4軸挿入編物の編成実施

強化繊維を図2-37のように配置できるように、編み組織を検討した（図2-38）。その結果、図2-39で示されるような4軸編物を編成することができた。

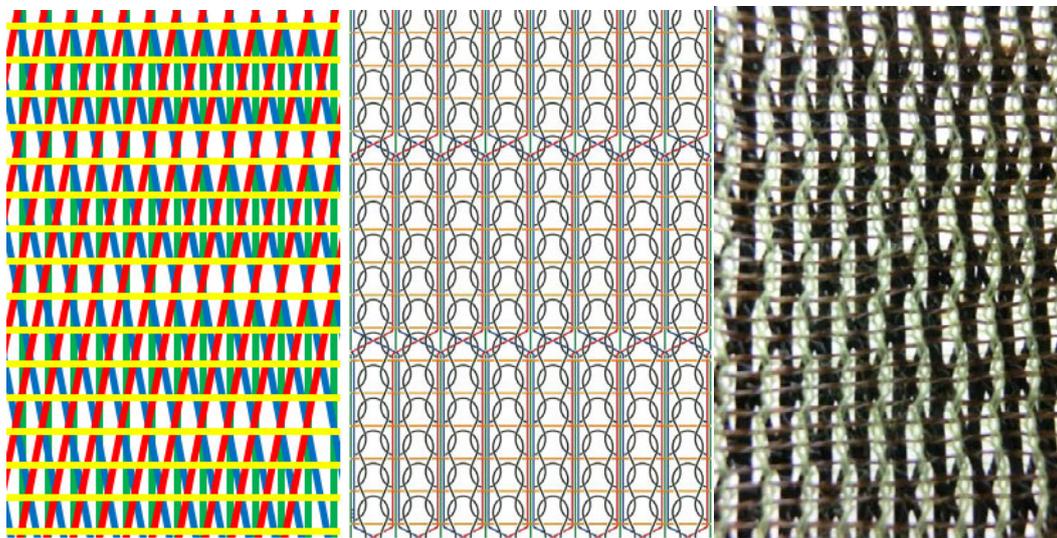


図2-37 繊維配置

図2-38 組織図

図2-39 4軸編物

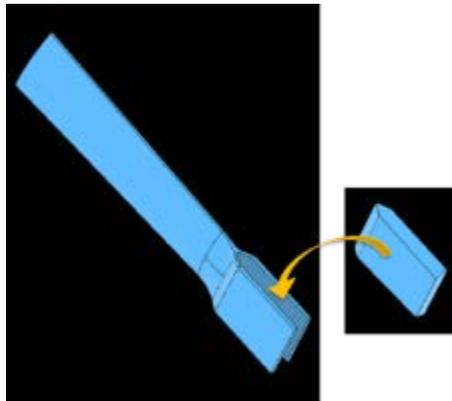
上記のように編機の改良によりブレードに要求される基材ができる基本技術は達成できた。但し、基材状態での繊維体積含有量（繊維空間密度）は目標の30%に対して、27.5%となり目標は達成できなかった。今後、繊維の織度アップなどにより改善される見通しである。

(5) ブレードのプリフォームの製作

当初ブレードプリフォームを一体型（立体）で編成する方向であったが、繊維の直線配向技術による編機側制約により完全一体型プリフォーム製作は多くの課題も残ることから、まずはこの研究開発の焦点となるFRP樹脂ブレードの製作に注力することとしてプリフォーム製作の方針を変更することにした。

i) ブレードプリフォーム製作のコンセプト

ブレード形状はブレード保持部とブレード本体で急激な厚みの変化がある為、図2-40のように外層部と保持部（増厚内部）の部分に分けて検討することにした。



外層部は外層部用として4軸編物を実践し、保持部は2軸編物で基材をつくるという考え方である。

理由として保持部はブレードの回転による応力も小さいことや編機効率上そのほうが望ましいと考えたからである。

図2-40 プリフォーム製作検討コンセプト

ii) 積層のコンセプト

従来の横編機では異なる繊維方向（単一直線配向のもの）を4枚積層することで強化繊維4軸を達成していたが、本研究開発で検討した新方式技術では4枚分を一度に編成することが出来、トータル積層枚数の1/4の枚数で編成することができるようになった。その違いを、次ページの図2-41、図2-42に示す。

【従来方式】異なる繊維挿入方向の生地を積層する必要がある。

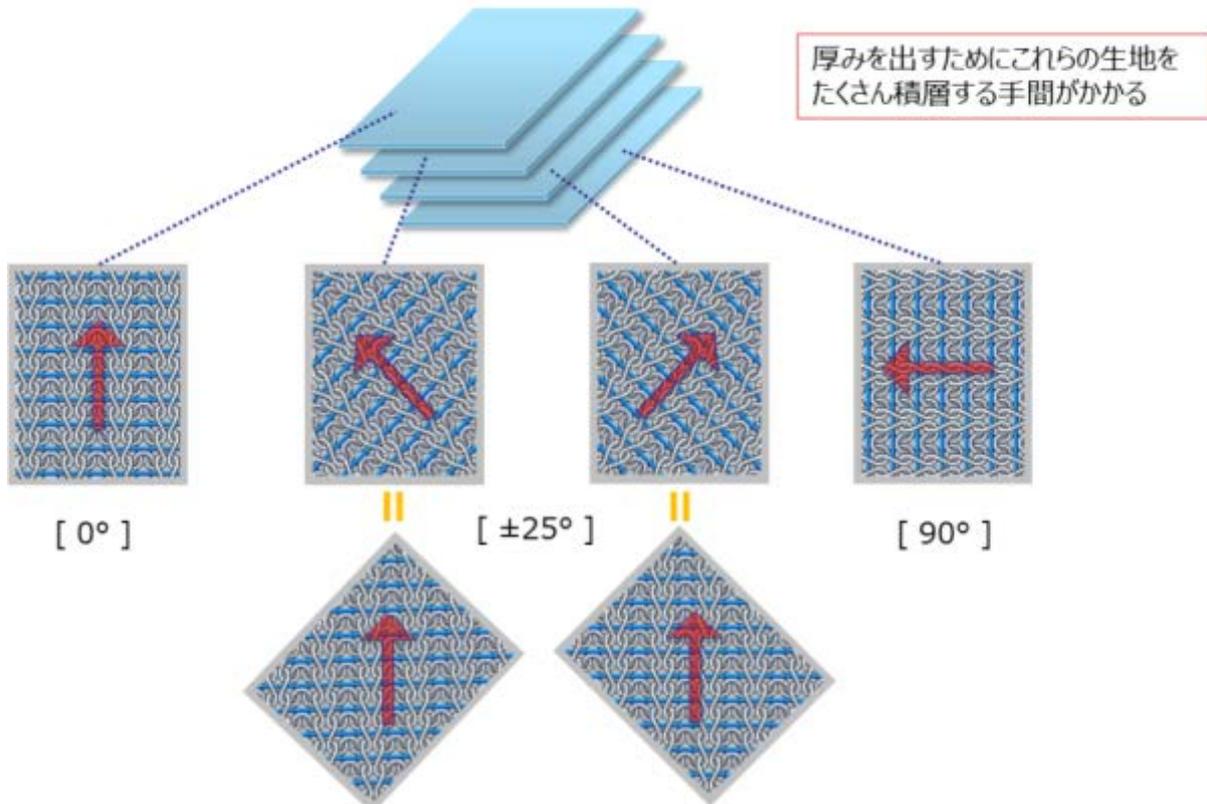


図2-41 従来の積層方式（4軸要求の場合）

【新方式】4軸挿入編地を1枚の編地で表現

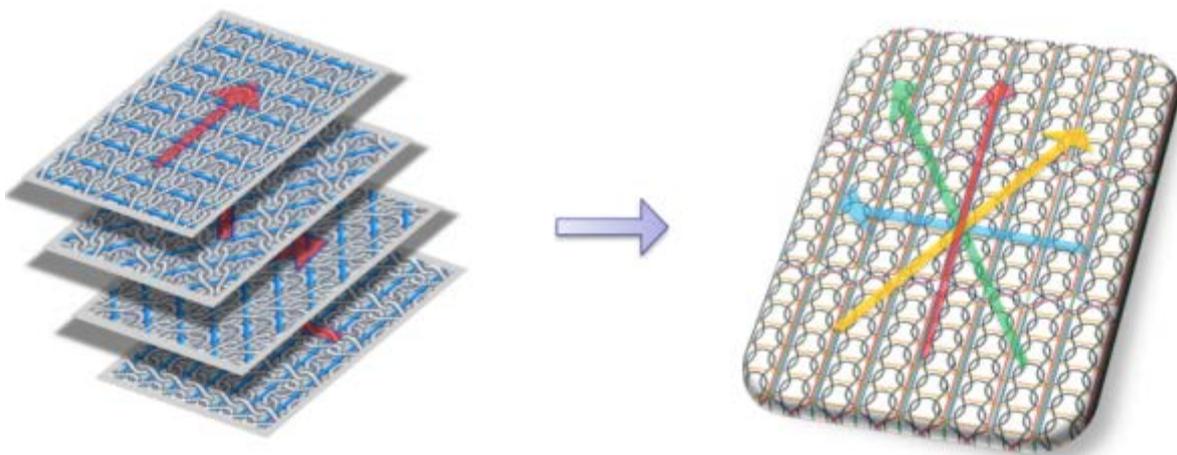
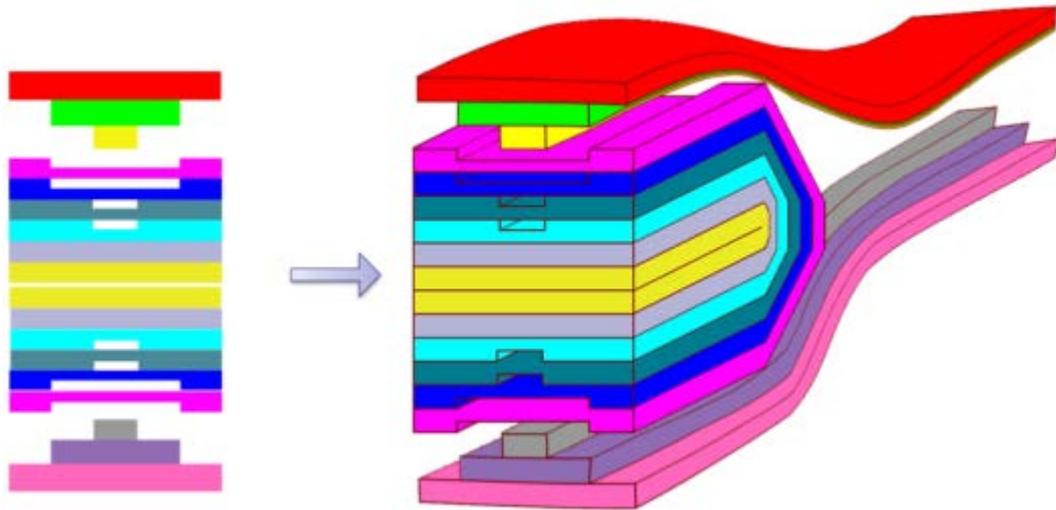


図2-42 新しい積層方式（特許出願準備中）

このように横編機ではニット生地緯方向への繊維挿入は確立されているが、複数の



方向に強化繊維等を同時に挿入できることは画期的であり、二次元的でなく生地の厚み方向へも考慮された立体的編成手法として評価することができる。これはホールガーメント®技術の特色の一つである立体成形とも言い換えることができる。この基本技術を用いてブレードの所定厚みを出すために4軸編物での積層を設計した（図2-43）。

図2-43 多軸挿入編物の積層イメージ

今回のブレード要求事項としてブレードの長手・短手方向で同時に肉厚の変化という課題があった。短手方向は4軸挿入生地の積層方法により図2-44のように厚みの変化をつけることができたが、長手方向は同じ4軸繊維割合をもって段階的に厚みを変化させることは期間内で考案した方法では出来なかった。別途今後の課題として認識している。



図2-44 ブレードのプリフォーム

この後 I.S.T による RTM 成形により図 2-45 のような耐熱ブレードが完成した。



図 2-45 耐熱ブレード完成品

今回は積層工程が入り、一体成形のプリフォームとはいえませんが積層工程が本来の 1/4 に出来たことは大きな進歩と考える。より一層の一体成形を目指し研究開発を引き続きすすめていく。

(6) ブレードプリフォームの生産性について

ブレード 1 枚に必要な生地を製作する為に 180 分を要する結果となっており、目標である 30 分以内での生産性は達成できていない。理由としては積層分の生地を複数編成することに起因する。将来的に一体型でできることになれば 30 分以内での編成が可能になると試算している。

2-6 RTM 成形技術の開発

2-6-1 プリフォームを用いたデサイジング工程の確立

市販の炭素繊維は繊維束保持を目的に主にエポキシ系樹脂によるサイジング処理がされているが、ポリイミドを含む高温成形条件化では硬化中にこの処理剤が熱分解しガスを発生、内部欠陥を招くことが一般に広く知られている。

但し、織り・編み・プリフォーム化いずれにおいても製造中の繊維束の保持は必要で、事前の糸の段階でこれを除去することはできない。よって必然的に織り・編み・プリフォーム化後の除去作業が要求され、除去作業中及び除去後の形状維持が重要な技術課題である。

デサイジング処理としては、溶剤による洗浄処理と熱分解による処理が一般的だが、今回はすでに 3 次元形状積層されたプリフォームが対象で、内部までの完全除去と特

に重要な形状保持の観点から洗浄は困難と判断し、熱処理を選択した。

プリフォームには、新規開発のポリイミド繊維を含んでおり加熱処理では上限温度の制約を受ける中での工程確立が要求される。

表2-8のとおり、ポリイミド繊維はガラス転移点温度未満の短時間であれば、強度への影響もほとんど無いことが確認された。

表2-8. ポリイミド繊維の高温時の強度保持率

| | 300℃ | 350℃ | 400℃ |
|------------|------|------|------|
| 30分後の強度保持率 | 112% | 107% | 91% |

今回注入するポリイミド樹脂「SKYBOND®RTM（品番：8000）」の推奨する標準硬化温度は335℃であり、RTM成形に対しても問題ないと考えられる。デザイン温度も硬化温度に合わせた335℃とし、時間によるサイジング剤の重量減少の表2-9に示す結果から、適切な作業時間を設定した。

表2-9. 炭素繊維のサイジング確認結果

| | サイジング率 w% | サイジング率 平均重量% | 検査成績書記載値 重量% |
|-------|--------------|-----------------|-----------------|
| テスト#1 | 1.27 | 1.29 | 1.2 |
| テスト#2 | 1.30 | | |

上記条件により、実際のブレード形状プリフォームにサイジング処理をした結果、形状を保持し、かつ可搬な工程が確立できていることを確認した。



図2-46. サイジング後のプリフォーム

2-6-2 製造安定性の高い短時間注入RTM成形工程の確立

量産性とその製造コスト軽減の観点から、成形作業時間の短縮も重要な技術課題である。今回は、高圧保持注入と徐変増圧注入の2案にて、注入時間短縮に取り組んだ。

本ブレード形状の成形においては、いずれの方法でも必要注入圧は 2 MPa と考えられ、この圧力で注入後の均衡を保った。実際に行ってみると高圧成形の方が注入に時間が掛かる結果となり、高圧注入＝短時間という単純な相関関係は無いようである。

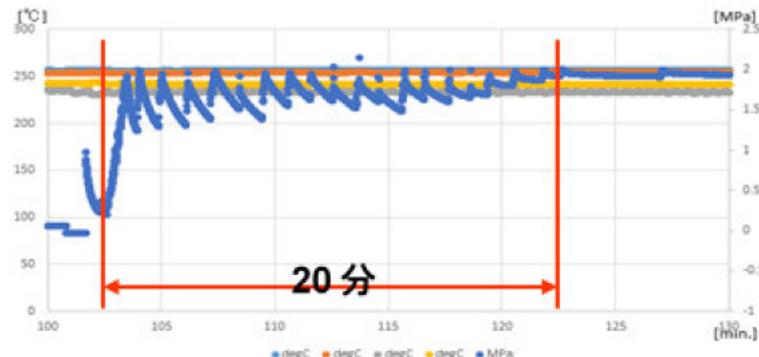


図2-47. 高圧注入による作業ログ

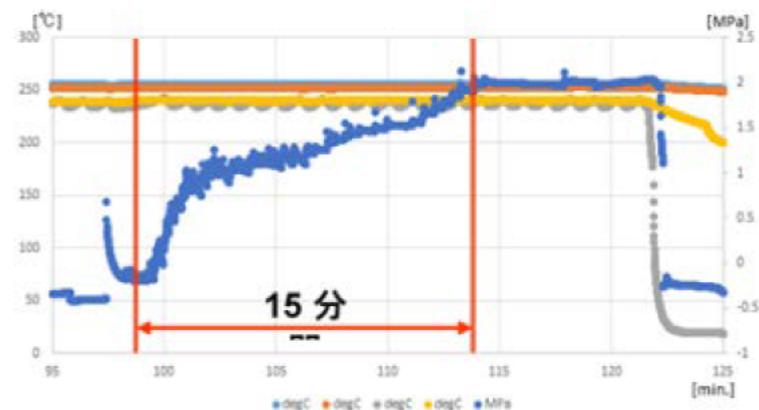


図2-48. 徐変増圧注入による作業ログ

徐変増圧注入方法を用いた注入条件の最適化を図った結果、最短注入時間は 15 分間となり、本開発目標を達成した。

図2-49に、製造の安定性として、同一寸法が担保できる CNC 機械加工トリム直後の重量を測定した結果を示す。

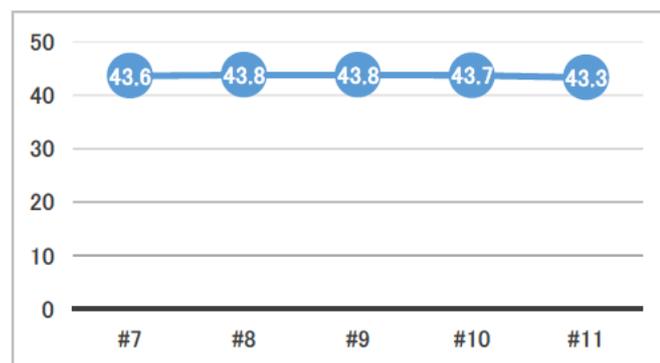


図2-49. CNC 機械加工トリム直後のブレード重量

図2-49のとおり、平均重量 43.55 g 誤差±0.6%と優れた製造安定性を示す結果となった。

同じく製造安定性の評価として、成形物の内部欠陥の検査を行った。複合材料の検査としては、超音波探傷検査が一般的ではあるが、本ブレードのような 3 次元形状かつ変肉厚の成形物の評価は極めて困難である。このためマイクロフォーカス X 線 CT 測定による非破壊検査を選択し実施した (図 2-50)。



使用機器

TOSCANER-32300 μFD
東芝 IT コントロールシステム(株)

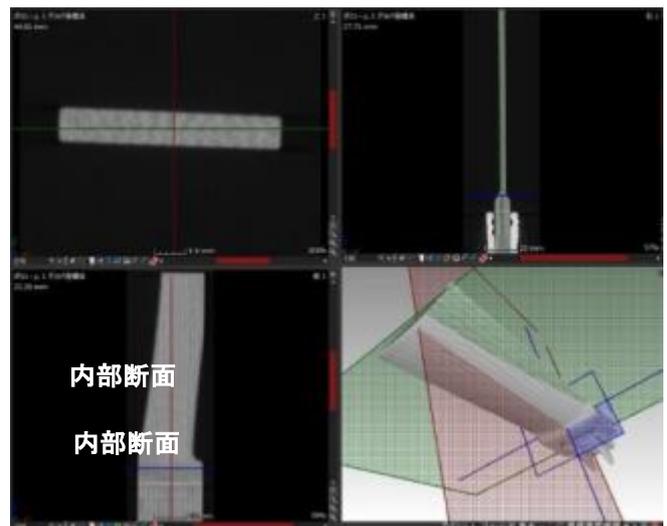


図2-50. X線CT観察画像

測定による内部の欠陥が認められなかったことにより、成形の安定性が確認された。同時に成形型設計の可視化実験による事前の不具合回避も有効に働き、ボイドレス成形の実現に寄与したものと考えられる。

第3章 全体総括

コンプレッサブレードの現行材質はチタン合金 Ti-6Al-4V であり、単純比較として同一ブレード形状での同一拘束荷重条件（13,200 rpm、空力あり）にて FEM 解析を行った（図3-1）。

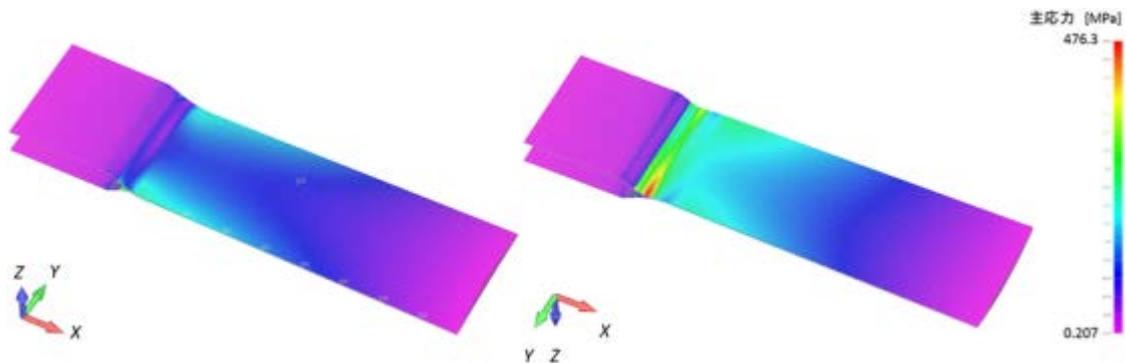


図3-1. 同一形状同一運用環境設定での Ti-6Al-4V 製ブレードの主応力解析結果

安全係数については、チタン合金は等方性金属材料のため主応力を算出し、新日鉄住金技術資料（図3-2）より 250℃環境の 0.2%耐力 650MPa を破壊基準として用いた。

解析により算出された主応力は 476.3MPa で、同一形状同一条件の場合の安全係数 f は、

$$f=650/476.3=1.36[-]$$

と算出される。

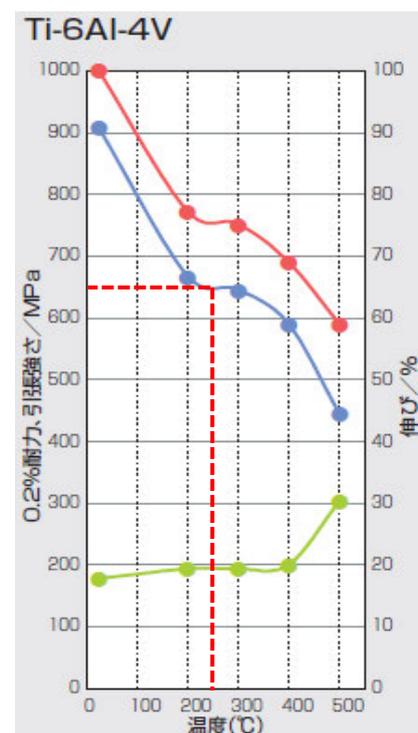


図3-2. チタン合金の物性

表3-1に、この Ti-6Al-4V 製ブレードと1-3-1での本開発 FRP 製ブレードの運用環境シミュレーション結果の比較まとめを示す。

表3-1. チタン合金製ブレードと本開発 FRP 製ブレードの比較まとめ

| | Ti-6Al-4V 製 ブレード | 本開発 FRP 製 ブレード | チタン合金 との比較 |
|--------------------------|---------------------|-------------------|---------------|
| 最大変位量[mm] | 2.18 | 1.53 | 約 30%小さい |
| 最大捻れ角[°] | 0.75 | 0.60 | 約 20%小さい |
| 安全係数 | 1.36 | 3.21 | 2 倍強 |
| 材料密度[kg/m ³] | 4,430 | 1,580 (※) | 約 60%軽量 |

※ 材料密度は本開発の目標値 1,500kg/m³を達成できなかった。

表3-1のまとめのとおり、現行のチタン合金 Ti-6Al-4V 製ブレードに対し、本開発 FRP 製ブレードの適用により、剛性及び強度を相当以上に確保しつつ大幅な軽量化が実現可能なことを示唆することができた。

以上