

高耐熱複合材料むけプリフォーム製織技術の開発

Development of High-productivity Weaving Technology for Preforms of Heat-resistant Composite Materials

中山 真広^{*1} 高島 宏明^{*1} 牧 亜矢^{*1} 吉田 祐介^{*1}
 Masahiro Nakayama Hiroaki Takashima Aya Maki Yusuke Yoshida

*1 CMプロジェクト

要旨

セラミックス基複合材料(CMC)むけプリフォームの製織技術の開発について報告する。CMCは優れた耐熱性と軽量性から航空機エンジン部品への適用が期待されている。当社は製織異常を自動検知する監視装置を開発するとともに、加熱によって短時間で除去可能かつ製織性の良いサイズ剤を開発することで工程の効率化を図った。これらにより製織レートを従来比で約4.4倍に向上させ、CMC部品の高レート製造技術の開発に貢献した。

キーワード: 複合材料、CMC、SiC繊維、多層織物

Abstract

This article reports on the development of high-productivity weaving technology for preforms used in ceramic matrix composites (CMCs) made with SiC fibers. Due to their excellent heat resistance and lightweight properties, CMCs are expected to be applied to aircraft engine components. In this development, an automatic monitoring system was designed to detect weaving defects, and a heat-removable sizing agent was introduced to improve process efficiency. These efforts successfully improved the weaving rate 4.4 times compared to conventional methods, contributing to the advancement of high-rate manufacturing technology for CMC components.

Keywords: Composite materials, CMC, SiC fibers, Multilayer textile

1 背景

1.1 CMCとは

セラミックス基複合材料、Ceramic Matrix Composites、CMCは耐熱性と軽量性を両立した材料として、とくに航空宇宙分野やエネルギー分野で近年注目を集めている^[1]。セラミックスは軽量かつ高耐熱であるが、靱性が低く脆い材料である。これと高強度繊維とを複合化した材料がCMCである。図1にCMCの微視構造の概略図を示す。CMCの最大の特徴は、セラミックス単体では得られない擬延性が発現する点にある。これは、高強度繊維との複合化に加え、繊維と母材の界面にすべり層(たとえば、劈開性を有する窒化ホウ素(BN)など)を形成することで実現される。とりわけ炭化ケイ素(SiC)繊維をSiCマトリクスで固めたSiC/SiC複合材料は、近年General Electric Companyが初めて民間航空機エンジンに採用し耳目を集めた。図2に航空機エンジンの概略図とともに、CMCの適用が期待される部品を示す^[2]。

1.2 次世代複合材創製・成形技術開発プロジェクト

当社は2020~2023年に実施された国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のプロジェクト(助成先:川崎重工業

(株)^[3]に委託先として参加した。当該プロジェクトでは次世代航空機エンジンむけに、最も高温の燃焼ガスにさらされる燃焼器パネルの材料としてCMCを適正なライフサイクルコストで実装することを目的とし、必要となる高レート・低コストのCMC材料およびCMC製造プロセスの技術開発を行った。

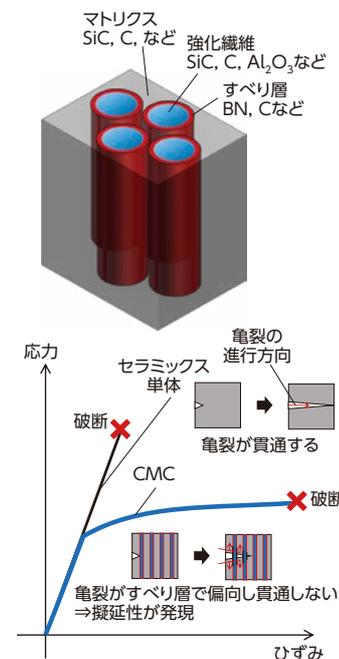


図1 CMC微視構造の概略図
 Fig.1 A Schematic View of CMC Microstructure



図2 航空機エンジンにおけるCMC適用部品 [2]
Fig.2 CMC Applications in a Jet Engine

本プロジェクト内でのCMC製造工程および分担を図3に示す。当社は製織工程を担当した。本工程の特長は材料特性および生産性を向上させるため、厚地の多層織物をプリフォーム（複合材料の強化繊維基材）として用いることである。単層織物の場合、所定の板厚になるまで積層することが必要であり、強化繊維のない層間が弱く破壊が進展する可能性がある。一方で、多層織物は各層が交絡した厚地の織物であり積層の必要がなく、工程の低コスト化に貢献する。また層間に強化繊維が配されているため、層間強化の期待ができる。図4にSiC繊維の多層織物を示す。本稿では開発したSiC繊維の製織技術について述べる。

No.	工程	
1	製織	
2	すべり層形成	
3	マトリクス形成	
4	耐環境コーティング	
5	最終加工	

図3 CMC燃焼器パネル製造工程およびその担当
Fig.3 CMC Combustor Panel Production Steps and Assigned Responsibilities

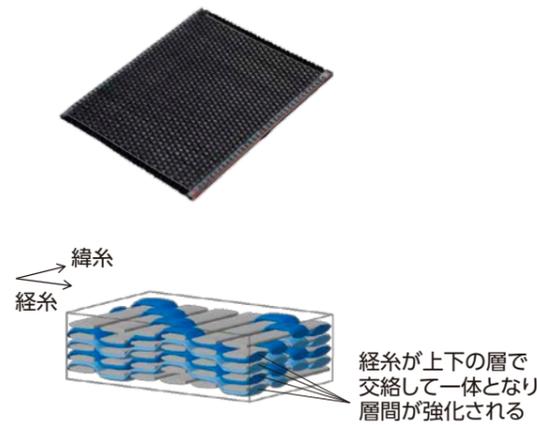


図4 SiC繊維 多層織物
Fig.4 Multilayer Textile of SiC Fibers

2 目的・実施項目

SiC繊維の高レート製織技術を開発することを目的とした。

製織レート r は式(1)で定義する

$$r = q \times a \quad \text{式(1)}$$

ここで q :良品率、 a :可動率である。 $0 \leq q \leq 1$ かつ $0 \leq a \leq 1$ であるから、 r は $0 \sim 1$ の値をとり、値が大きいほど良品を早く製織できることを表す。

SiC繊維は脆いため折損や毛羽が発生しやすい。SiC繊維の製織時に発生する異常には二つのモードがある。製織中に経糸が切れる「経糸切れ」および、毛羽が絡まることにより経糸が開口運動に追従しない「開口不良」である。図5に織機の五大運動および製織異常モードを示す。いずれの異常モードも発生すると、経糸の掛け直しや毛羽の除去などの修正作業に多大な時間を要するため、可動率 a が低下し製織レートが低下する。さらに、これらの異常発生を見逃すと、糸が正常に織り込まれなくなり織物の組織異常を引き起こす。その結果良品率 q が低下し製織レートが低下する。すなわち、異常発生を抑制することのほか、発生した異常を確実に発見・停止し不良織物を製造しないことが、高レート製造および低コスト化には不可欠である。本プロジェクトにて「異常発生の抑制」および「異常の発見・織機の停止」の両方を検討し、以下の2項目を実施した。

- ・異常監視の自動化
- ・サイズ剤の開発

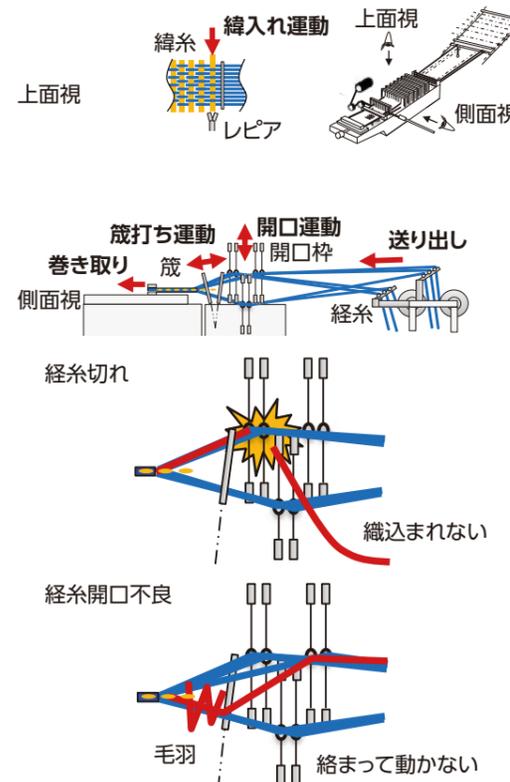


図5 織機の五大運動および製織異常
Fig.5 The Five Major Motions of a Loom and Weaving Defects

3 結果

3.1 異常監視の自動化

下記を条件とし、異常監視装置を開発した。

- ・「経糸切れ」「開口不良」の両異常モードを検知できること
- ・監視装置による糸折損を発生させないこと
- ・異常検知後、次動作前に織機を停止させ、組織不良の織物を製織しないこと

図6に開発した製織異常監視装置の機台上での設置箇所を示す。

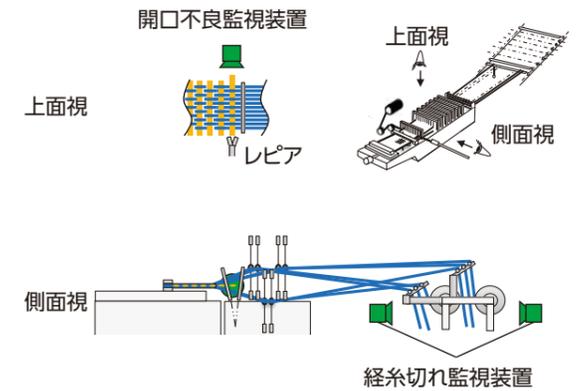


図6 製織異常監視装置の設置箇所
Fig.6 Installation Locations of Weaving Defect Monitoring Devices

経糸切れ監視装置は送り出し装置の前後に設置し、経糸の送りが正常になされているかどうかを監視する。開口不良監視装置は開口部に設置し、開口が正常になされているかどうかを監視する。糸折損を発生させないため、両監視装置は非接触で画像から異常を検知する方式とした。監視は織機の動作中は常に行われており、装置が異常を検知すると織機に非常停止信号が入力され、製織を停止し前述の組織異常を防ぐことができた。

3.2 サイズ剤の開発

前述の通り、SiC繊維は脆く折損しやすいため、製織を行うには耐摩擦性を向上させる糊剤であるサイズ剤が不可欠であり、その特性は製織性に大きな影響がある。一方でサイズ剤はすべり層の形成時には不純物となるため、製織後には除去が必要である。従来は湯洗いによる除去（湯洗デサイズ）が必要なサイズ剤を用いているが、デサイズ工程に最長8時間を必要とするため高レート生産の課題の一つであった。その対策として当社は、製織性を悪化させることなく工程の時間短縮が可能な、加熱によって除去できる（熱デサイズ）サイズ剤を開発した。

3.2.1 製織評価

開発した熱デサイズタイプのサイズ剤（開発剤）をSiC繊維に塗布し製織した。また比較評価のため、従来の湯洗デサイズタイプ（従来剤）を塗布した糸でも同様に製織した。開発剤を塗布した糸での製織時にはほぼ経糸切れ、開口不良などの製織異常は発生せず、従来剤と同等の製織性を示すことを確認した。

3.2.2 デサイズ評価

前項で製織した織物について、川崎重工業(株)にてデサイズ評価を実施した。不活性雰囲気下(窒素、1000℃、5min) および大気雰囲気下(大気、500℃、10min)にて熱デサイズした結果、いずれの織物も残ったサイズ剤量はすべり層の形成時に問題とならないことが確認された。例として不活性雰囲気下での熱デサイズ後および比較として従来剤の湯洗後のSEM観察結果を図7に示す。開発剤は製織後の加熱により除去できることが確認され、製織性を損なわずに、従来の湯洗と比較してデサイズ工程の時間短縮が可能となることが示された。

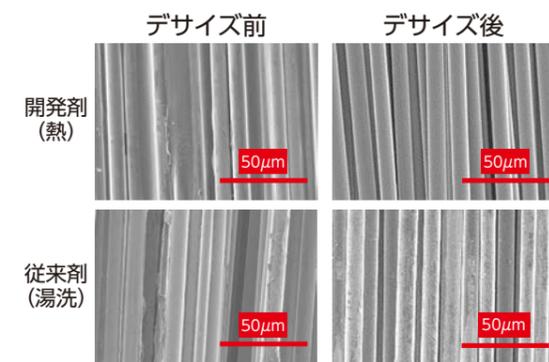


図7 デサイズ後織物SEM観察
Fig.7 SEM Observation of Fabric After Desizing

3.3 製織レート評価

図8にプロジェクト当初と製織異常監視装置を導入し、かつ開発サイズ剤を糸に塗布した際の製織レートを比較して図示する。開発成果により製織レートを約4.4倍まで高め、目標値を満足することができた。

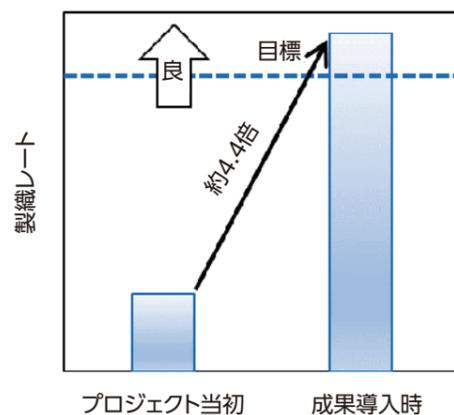


図8 プロジェクト当初-開発成果導入時点での製織レートの比較
Fig.8 Comparison of Weaving Rates Between Project Start and Post-Implementation of Development Outcomes

4 まとめ

- ・次世代複合材創製・成形技術開発プロジェクトにおいて当社が担当した開発について述べた
- ・脆く折損しやすいSiC繊維を高レートで製織するために製織異常監視装置の開発および熱デサイズ可能で製織性を損なわないサイズ剤の開発を実施した
- ・開発成果を導入することで製織レートを約4.4倍まで高めた

本開発にて製織レートが量産事業への適用に見合う目途を得た。プロジェクトの今後の課題はCMC材料としてのTechnology Readiness Level, TRL 技術成熟度やManufacturing Readiness Level, MRL 製造技術成熟度の向上である。当社では、エンジンの開発スケジュールに合わせて、試作品の製作や認証取得の準備を進める計画である。

また、この開発で培ったSiC繊維の製織技術をエネルギーなど他分野への横展開することも検討中である。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成業務(JPNP20010)の結果得られたものである。

参考文献

- [1]George Karadimas and Konstantinos Salonitis, "Ceramic Matrix Composites for Aero Engine Applications—A Review," Applied Science, 13, 3017, 2023
- [2]Jim Steibel, "Ceramic matrix composites taking flight at GE Aviation," American Ceramic Society Bulletin, Vol.98, No.3, pp. 30-33, 2019
- [3]<https://www.nedo.go.jp/content/100969374.pdf>

著者紹介



開発の経緯と開発者の思い

SiC繊維の製織に初めて取り組んだ際、その脆さと扱いづらさに直面し、試作は幾度となく失敗を重ねました。糸切れや開口不良といった異常の連続に、製織工程の安定化は遠い目標に思えました。監視装置の開発では、異常の定義や検知精度を巡って議論が尽きず、画像認識の調整には多くの時間を要しました。サイズ剤の開発・評価も難航し、熱デサイズの条件出しには繰り返しデサイズ評価を行いました。それでも、製織レートが向上したときの達成感は格別で、チーム全員の努力が報われた瞬間でした。本技術がCMCの量産化に貢献し、将来的にはエネルギー分野などへの展開にもつながることを期待しています。