

平成26年度
ものづくり中小企業・小規模事業者等連携事業創造促進事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「熱可塑性CFRP材による風力発電用ブレードの、中空構造
ハイサイクル成形及び溶着技術に係る研究開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成27年 3月

委託者 中部経済産業局
委託先 国立大学法人岐阜大学

この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2-1 ハイサイクル成形技術（連続プレス成形技術）の開発
 - 2-1-1 温度制御の検討
 - 2-1-2 プレス成形方法の確立
- 2-2 同部材接着技術の確立
 - 2-2-1 レーザーによる接合手法の確立
 - 2-2-2 接合条件の検討
- 2-3 熱可塑性CFRPブレードの評価
 - 2-3-1 成形ブレードの評価
 - 2-3-2 耐雷性の評価・事業化の検討

第3章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1) 研究開発の背景

エネルギーを安定的かつ適切に供給するためには、資源の枯渇のおそれが少なく、環境負荷が少ない再生可能エネルギーの導入を一層進めることが重要である。再生可能エネルギーの中でも風力発電は、経済性(発電コストが比較的安価)、効率性(設備利用率が大きい)及び環境性(エネルギーペイバックタイムが短い)に優れていることから、世界的に大規模な実用化が進んでおり、2020年には世界の電力需要量の4.5~11.5%に達するといわれている。このような中で、工場や商業施設及び一般家庭用に適するだけでなく、無電化地域での携帯基地局等の電源確保に小型風力発電が世界的に注目されている状況である。

小型風力発電システムに関しては、3枚翼のプロペラ型風力発電と流線形の直線翼を円筒状又は円錐状に複数枚等間隔に並べた垂直軸風車の直線翼ダリウス型風力発電等がある。

この中で、プロペラ型の発電効率が最も高いために、導入実績が一番多い状況である。

このブレードであるが、中身(芯)は、ウレタン等の充填剤で満たされていて、表面がCFRPで成形されている。そして、その生産方法は熱硬化性CFRPを手作業で貼り付けて硬化させていることから、生産性が悪くコスト高の要因となっているのが現状である。

2) 研究目的及び目標

このような背景のもと、風力発電装置に関しては、今後国際競争激化する中で、低コスト化が川下事業者のニーズとして顕在化している。本研究開発は、川下事業者のニーズである低コスト化とリサイクル性、生産性の向上と発電効率を図るために、現在ブレードに使用されている熱硬化性CFRPを熱可塑性CFRPに変更しながら、その中で、熱硬化性が有する剛性、強度を維持するための成形法を開発するとともに、リサイクル性にも寄与する計画である。

熱可塑性CFRPに関しては次のメリット・デメリットを有している。

メリット	層間剥離が生じない。 加熱で接合でき、修理可能。 リサイクル性が高い。 等
デメリット	引張/曲げ強度が弱い。 耐候性が弱い。 吸水率が高い。 等

そのため、熱可塑性CFRP固有の特性を理解しながら研究開発を実施するためには、次の課題及びその対応が必要となる。

熱可塑性CFRPでの研究開発における課題及び対応等

区分	現状の課題	課題への対応等
ハイサイクル成形技術の確立 (中空構造のプレス成形技術の確立)	<ul style="list-style-type: none"> ・コスト低減 ・強度確保・剛性維持 熱硬化に比し1/2以下	<ul style="list-style-type: none"> ・生産性向上のため金型の冷熱制御の検討 ・中空構造での断面形状の検討(リブ等の導入)
同部材の接着技術の確立 (レーザー溶着)	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー透過による熱可塑性同部材の接着は困難 	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザービーム透過性の溶着ワイヤー及び供給装置の開発 ・レーザービーム溶着条件の検討

この課題に対する対応に関しては、以下の研究開発を通じて解決する計画である。

ハイサイクル成形技術（連続プレス成形技術）について

現在のブレードは、中身（芯）がウレタン等の充填剤で満たされ、表面がGFRP又はCFRPで成形されているが、その生産方法は手作業主体の成形法のために、軽量化が困難で、生産性が悪いことから、コスト高となっている。そのため、本研究開発では、外表面を2分割したプレス成形法を確立し、ハイサイクル成形による低コスト化を目指す。

これにより、剛性等に関しては、現状の熱硬化性CFRPのブレードと同程度を維持しながら、生産性を現状の2倍近くに増加させ、低コスト化を図る計画である。

同部材接着技術の確立について

熱可塑性CFRPの同部材接着（接合）方法としては、現在適切な方法がない。そこで、本研究においては、レーザー透過溶着法（LTW）、レーザー肉盛溶接法、およびレーザーモザイク接合法に着目して接着部の形状、強度を維持する方法に関して、マトリックス樹脂（熱可塑）と同材のフィルム又は線材を介してレーザー溶着法を研究開発することにより、接着の高速化、信頼性の維持を図りながら熱硬化性CFRPと同程度の剛性を維持することを目標とする。

熱可塑性CFRPブレードの評価について

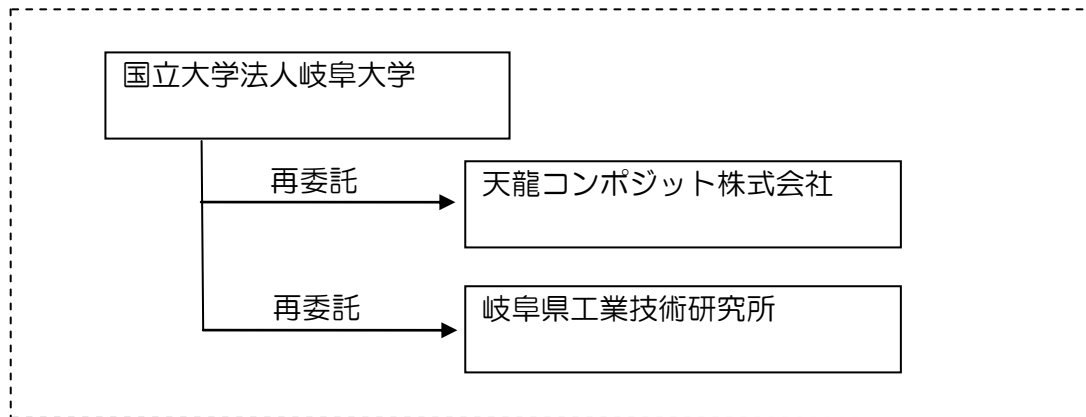
中空プレス成形法により成形されたブレードに関しては、熱硬化性CFRPと同程度の剛性、強度等を維持しながら軽量化を図る必要があることから、成形されたブレードに係る評価を実施しながら、その結果を成形方法及び接着技術等へフィードバックする。

以上の研究開発の目標値は以下のとおりである。

区分	現状（材料：熱硬化性）	目標値（材料：熱可塑性）
引張り強度	470MPa	470MPa
引張弾性率	55GPa	55GPa
重量（ALダイキャスト含）	380g	380g
生産性	15枚/日	30枚/日
コスト	100	65

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

1) 研究組織（全体）

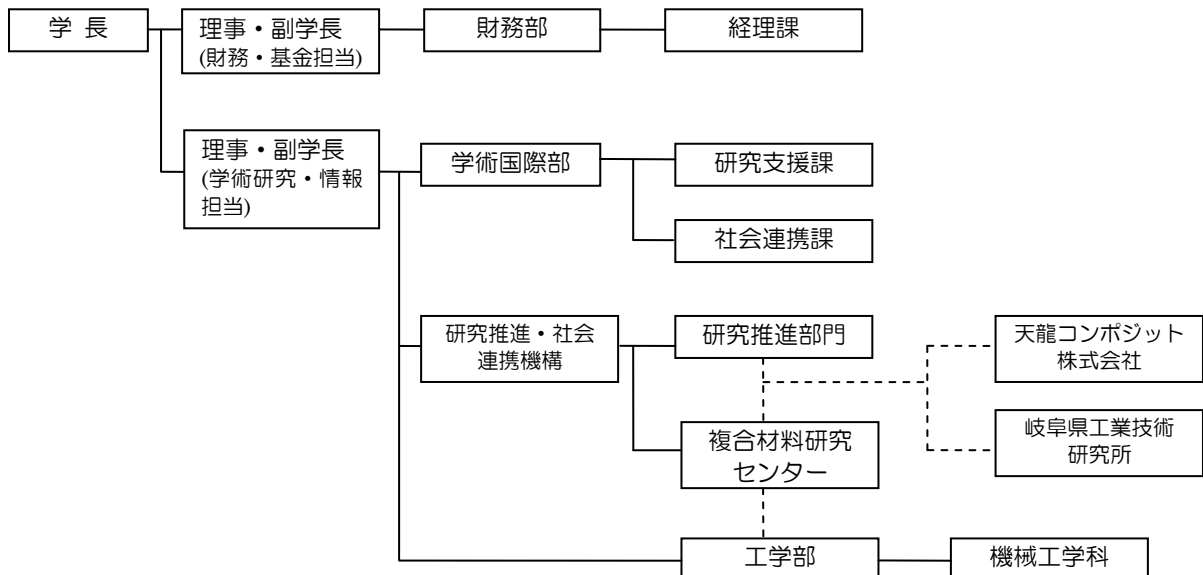


総括研究代表者（PL） 所属 天龍コンポジット株式会社 役職 技術営業部長 氏名 新川 雅司	副総括研究代表者（SL） 所属 国立大学法人岐阜大学 役職 教授 氏名 三宅 卓志
--	---

2) 管理体制

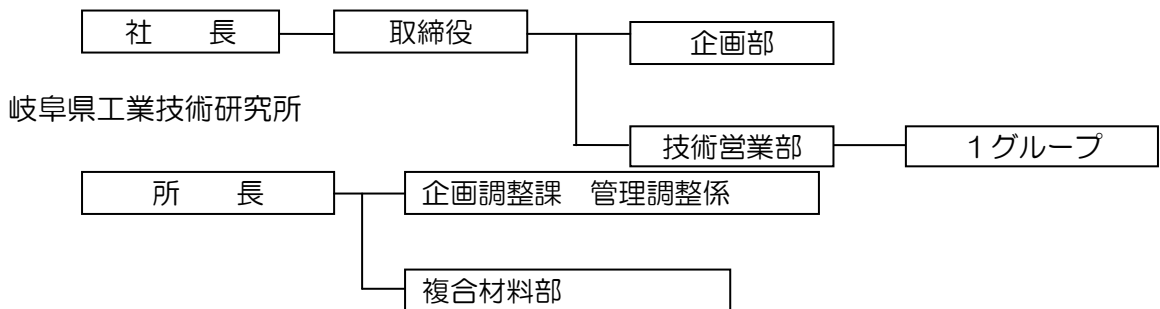
①事業管理機関

国立大学法人岐阜大学



② 再委託先

天龍コンポジット株式会社



3) 管理員及び研究員

【事業管理機関】

国立大学法人岐阜大学

管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
馬場 大輔	研究推進・社会連携機構 研究推進部門 特任准教授	プロジェクトの 運営管理・運営
品田 由美	研究推進・社会連携機構 准教授	
中三川敏之	学術国際部 社会連携課長	

研究員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
三宅 卓志	工学部 機械工学科 教授	2-1-2、2-3-1
井上 吉弘	工学部 機械工学科 准教授	2-1-1、2-3-1
鳥羽 景介	複合材料研究センター 特任助教	2-1-2、2-3-1

【再委託先】

天龍コンポジット株式会社

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
新川 雅司	技術営業部長	} 2-1-1 2-1-2 2-2-1 2-2-2 2-3-1
吉田 崇	技術営業部・1グループ・課長	
石神 武広	技術営業部・1グループ・係員	
西尾 哲也	技術営業部・1グループ・係員	
田中 聖也	技術営業部・1グループ・係員	

岐阜県工業技術研究所

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
道家 康雄	複合材料部 主任専門研究員	} 2-1-2
仙石 倫章	複合材料部 研究員	

1-3 成果概要

1) ハイサイクル成形技術（連続プレス成形技術）の開発

①温度制御の検討

熱可塑性CFRP材料に関して、ヒーティングゾーンで予熱後、成形プレスにより成形を行うが、この場合予備加熱温度、予備加熱時間、金型冷却温度、金型冷却時間等の冷熱制御が重要なポイントとなる。その為、素材の「プレヒートシステム」及び「金型温度制御システム」を導入し熱可塑性CFRP材料の予熱方法や金型の温度制御の検討を行い、導入した「金型冷却システム」を使用して金型冷却手法の調査を実施した。

（成果）

初年度に「プレヒートシステム」「金型温度制御システム」「金型冷却システム」を導入し今回のブレード試作に使用する熱可塑性CFRP材料の予備加熱条件、プレス成形条件、成形サイクルタイムを把握することが出来た。

成形サイクルは金型の昇温、降温の時間に著しく依存しており特に冷却過程の金型表面温度差はブレード成形品への影響が大きく、表面温度差を縮め冷却スピードをいかに早くするかがサイクルの短縮、良品の成形に繋がることわかっている。3年間の研究を通して、これらの懸念事項を調査、研究し基礎データを採取し目標サイクルタイムを達成することができた。

②プレス成形方法の確立

中空構造体のブレードをプレス成形するためにはその形状に適した成形性の良い熱可塑性CFRP材料を選定する必要がある。その為平板用金型、リブ評価用金型を導入しテストピースを作成して物性評価を行いながら樹脂系、基材構成、断面形状を設計するための基礎データを採取した。またブレード用金型（フロント・リア）を導入し、成形されたCFRPの強度等に係る分析を行い、ホットプレスに適した加熱条件を検討する為、赤外線サーモグラフィーにより温度分布画像の解析を行った。さらにプレス成形した積層板の積層強度や信頼性を確保するため分光装置を導入して層間の再凝固層の解析も実施した。さらにレーザー溶接時の溶接性の向上や反りの低減のために、導入したブレード用金型を改造して更なるブレード試作品の精度向上を図った。

（成果）

初年度は熱可塑性CFRP材料の成形条件を概ね把握し二年目に於いては赤外線サーモグラフィーを使用して更なる予備加熱条件やプレス成形条件の調査を行い中空構造体のブレード成形に適した各種条件を把握することが出来た。また成形された熱可塑性CFRP平板を使用した物性評価により、引張強度は最終目標値を達成、引張弾性率は9割の値まで達成していることを確認した。ブレードの成形においては材料保持を目的とした耐熱シート無しで予備加熱する工法を開発し特許申請を行った。

3年目にはブレード成形用金型を改造したことによりブレード成形品フロント・リアの位置決めが確実に行うことが出来、溶接性を向上させることができた。

2) 同部材接着技術の確立

①レーザーによる接合手法の確立

②接合条件の検討

レーザー透過溶着法では、レーザービーム透過樹脂部品とレーザービーム吸収樹脂部品との接合は可能であるが、同質の熱可塑性CFRP部品の接合は困難である。その為同部材の熱可塑性CFRPに対しレーザービームによる接合を行うために溶着ワイヤーの開発や接合方法の検討及び接合条件の検討を行い各種条件だしを行った。また、CFRPの開先加工及び接合が可能なシングルモードのファイバーレーザー発信機とワイヤー供給装置を付けた6軸ロボットを用いたCFRP用レーザー溶接システムを導入して溶接試験及びブレード成形品の溶接を実施した。

(成果)

初年度においてはまだレーザー溶接システムが導入されておらず、熱可塑性CFRPのレーザー溶接の基礎実験を株式会社最新レーザ技術研究所に委託して実施した。レーザー照射後の熱可塑性CFRPの溶融状態の確認や使用候補材料のレーザー透過性等の確認を実施して基礎データを採取した。

2年目ではレーザー溶接システムを導入し試作したフィラーワイヤーを使って溶融試験を行い1年目に引続き更なる基礎データを採取した。

3年目では熱可塑性CFRPに適した溶接を実施するため、レンズユニットや加工トーチブラケットを改造し、またブレードの全周溶着ができるように固定治具を製作した。これらのレーザー溶接システムを使用して、前年度までの基礎実験データをフィードバックし更なる実験を重ねブレードに適した溶接条件を研究することによりブレード成形品への溶着が可能となった。今後は更なる溶着精度の向上、溶着品質の向上に向けて引続き研究開発を実施する。

3) 熱可塑性CFRPブレードの評価

①成形ブレードの評価

試作成形したブレードフロント・リアのブレードとしての強度・剛性を確認するために曲げ試験を実施した、また、3年目においてはレーザー溶着された試作ブレードを次項耐雷性の評価・事業化の検討にて実施した。

(成果)

本事業で開発した材料及び工法で試作成形したブレードが、目標とする従来品の強度、曲げ剛性に達することを確認した。

②耐雷性の評価・事業化の検討

試作成形されたブレードの耐雷性に関して、ナショナルコンポジットセンターから評価方法に関するアドバイスを受けながら、試験を実施して受雷ブレードの状態を調査した。また、本研究開発の成果を事業化する際に有益な性能について検証した。具体的には、川下ユーザーでアドバイザーでもあるゼファー株式会社の指導を受けて事業化に必要な試験を実施した。

(成果)

本事業で試作成形したブレードに実際の雷を模擬した電流を印加し受雷したブレードの状態を調査した。今回の試験の結果、雷模擬電流を受けた試作ブレードは爆裂した状態となり、実際の落雷を受けた場合も同様の状態となることを確認することが出来た。

事業化に必要な試験においては、レーザー溶接されたブレード完成品の曲げ剛性が従来品と同等であることが確認できたが発電性能において、低風速時の発電性能が従来品よりも悪かった。理由としてはブレードの風を受ける重要な形状がでていないことが考えられた。今後はこれらの問題を解決すべくブレード形状の安定化を目指し研究開発を実施する。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

国立大学法人岐阜大学

(最寄り停留所：岐阜乗合自動車 岐阜大学・病院線 岐阜大学)

〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1番1号

担当：研究推進・社会連携機構 研究推進部門 特任准教授 馬場 大輔

TEL：058-293-2089 FAX：058-293-2022

E-mail：sapoin@gifu-u.ac.jp

第2章 本論

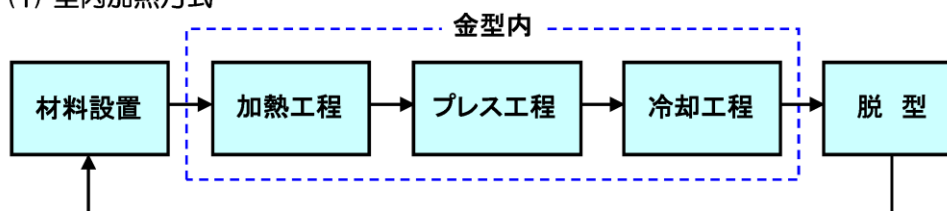
2-1 ハイサイクル成形技術（連続プレス成形技術）の開発

2-1-1 温度制御の検討

現在、実用化されている熱硬化性GFRPあるいはCFRP小型風車ブレードの生産方法は、手作業が主体で生産性が悪く、構造上の問題から軽量化が困難であるという問題を抱えており、製品価格は高止まりの状況にある。すなわち、小型風車の普及を促進するためには、風車性能の向上のためのブレード軽量化を達成でき、生産コスト低減のための生産方法の開発を実現しなければならない。もちろん、材料の選定と構造の最適設計も重要な要素となる。本研究開発は、風車ブレードを2分割式の中空構造とし、熱可塑性CFRP材料をプレス成形およびレーザ溶着することにより、剛性等に関しては現状の熱硬化性CFRPブレードと同程度の性能を維持しながら、軽量化と低コスト化を達成しようとするものである。

一般に、熱可塑性CFRP材料の生産では、図 2-1-1-1 に示す成形工程が採用されている。材料はヒーティングゾーンで加熱された後、金型を用いたプレスにより賦形され、冷却・凝固後に脱型される。この際、加熱温度、加熱時間、冷却温度、冷却時間等の冷熱制御が重要なポイントとなる。この一連の工程の中で、ヒーティングゾーンをどこに設けるのかによって、大きく2つの方式が考えられる。(1)型内加熱方式では、生産設備全体をコンパクトな構造とすることができるが、金型自身の昇温に依る場合には熱容量の大きな金型の昇温に必要な時間が問題となり、成形サイクル時間の短縮は困難である。また、型開きの状態で加熱装置（例えば、高周波誘導加熱装置）を挿入し、材料を直接加熱する方法もある。この場合には所要時間の問題は解決されるが、設備の共通化が困難であり、設備コストが高くなる。一方、(2)予備加熱方式では、金型プレス装置とは切り離れたところにヒーティングゾーンを設け、予備加熱された材料を金型内に搬送・設置する。このため、生産工程は独立し、サイクル時間の短縮化が行い易くなる。加えて、設備の共通化によるコスト削減効果も期待できるため、本研究開発では予備加熱方式を採用することとした。また、冷却工程では、金型内に設けた水管に冷水を流し、金型キャビティに接する製品から金型へ、そして金型から流水へという熱伝達によって製品の冷却を行った。

(1) 型内加熱方式



(2) 予備加熱方式

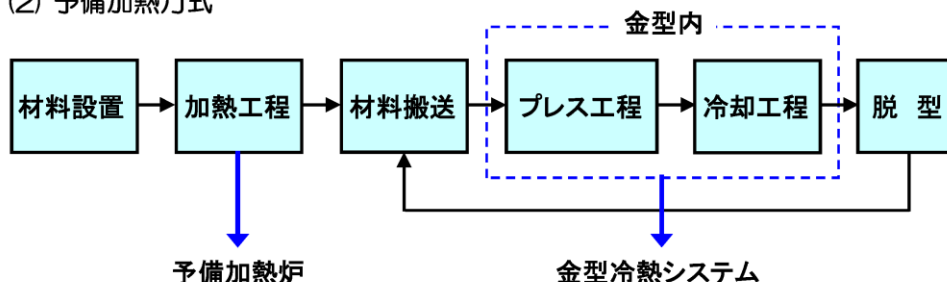


図 2-1-1-1 成形サイクルの概要

初年度においては図 2-1-1-1 (2) に示す予備加熱方式でプレス成形を実施する為、予備的検討を実施した。研究開発ポイントとしては、予備加熱炉の設定温度と加熱時間を最適化するとともに、熔融し流動状態にある加熱材料の把持・搬送方法の開発と製品の一様かつ迅速な冷却の達成が挙げられる。研究開発にあたって留意すべき事項を、成形工程を2つに分けて以下に示す。

- プレス開始までの、加熱工程
 - 金型キャビティ内への樹脂の充填
 - 構成材料の層間への空気介在の防止
 - 脱型時、成形品の反りやねじれの防止
 - 予備加熱炉内および材料搬送中の材料把持
- プレス開始から脱型までの、金型プレス・冷却工程
 - 熱可塑性CFRP材料の母材樹脂の流動性確保
 - 母材樹脂の局所的な熱変性の抑制

上述の成形法を確立するために、実施計画書に記載のとおり、「予備加熱炉」と「金型冷熱システム」を導入した。両設備の概略は次の通りである。

(予備加熱炉)

熱可塑性CFRP材料に関しては、プレス成形を円滑に行うために、事前に熱を加えて暖めておく必要がある。加熱温度等に関しては、対象とする素材がPA66、PPS、TPU等が想定されることから、最大450℃を設定するとともに、加熱時間も急速に実施できる装置とする。(図 2-1-1-2)

(金型冷熱システム) — 金型昇温制御システム、金型冷却システム

金型に対して、加熱及び冷却を制御(加熱・冷却時間、加熱・冷却温度等を制御)する装置であり、導入予定の成形用金型に係る制御条件等のデータ収集により冷熱制御の確立を図るものである。(図 2-1-1-3) (図 2-1-1-4)



図 2-1-1-2 予備加熱炉



図 2-1-1-3 金型昇温制御システム



図 2-1-1-4 金型冷却システム

また、初年度には平板用金型（図 2-1-1-5、図 2-1-1-6）、リブ評価型用金型（図 2-1-1-7、図 2-1-1-8）を導入して物性試験用テストピースの製作や、基材構成の調査、リブの断面形状等の基礎データを採取し強度解析等を行いながら成形されたブレードが熱可塑性CFRPと同程度の剛性を維持するための成形方法の確立を図った。また、導入した赤外線サーモグラフィーを使用して予備加熱した熱可塑性材料の温度分布も調査し均一に加熱されていることを確認した。

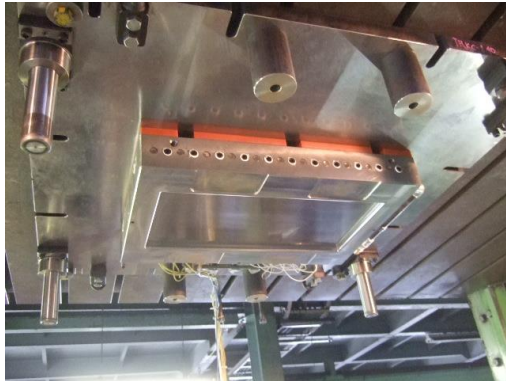


図 2-1-1-5 平板用金型 上型



図 2-1-1-6 平板用金型 下型

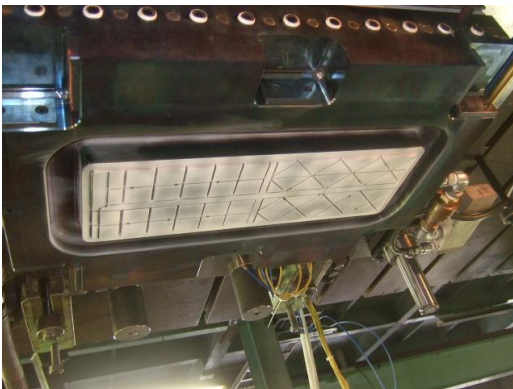


図 2-1-1-7 リブ評価型用金型 上型



図 2-1-1-8 リブ評価型用金型 下型

平板用金型を使用した成形品を図 2-1-1-9 に、リブ評価型用金型を使用した成形品を図 2-1-1-10 に示す。



図 2-1-1-9 成形後のシート材B



図 2-1-1-10 シート材B+UD+シート材B

3年目においてはブレードの更なる成形精度の向上、レーザー溶着性の向上のため、マニホールド化された冷却水管に流量調整バルブの追加、嵌め込みダボの追加、開先ギャップの追加、ブレード軸方向のリブ追加等の改造を施した。
改造後のブレード用金型の写真を図 2-1-1-12 にブレード成形品の写真を図 2-1-1-13 から図 2-1-1-16 に示す。(図 2-1-1-11 は改造前)



図 2-1-1-11 ブレード用金型 改造前



図 2-1-1-12 ブレード用金型改造後



図 2-1-1-13 ブレード成形品 フロント



図 2-1-1-14 ブレード成形品 リア



図 2-1-1-15 ブレード成形品フロント翼根



図 2-1-1-16 ブレード成形品リア翼根

さらにこれらの改造を施したブレード用金型を使用した成形サイクル調査を実施。ブレード用金型フロントの調査結果を図 2-1-1-17 にリアの調査結果を図 2-1-1-18 に示す。(成形サイクル調査は金型表面温度で判断した)

ブレードFR改造後成型型 型成形サイクル(天龍コンポジット冷熱システム)

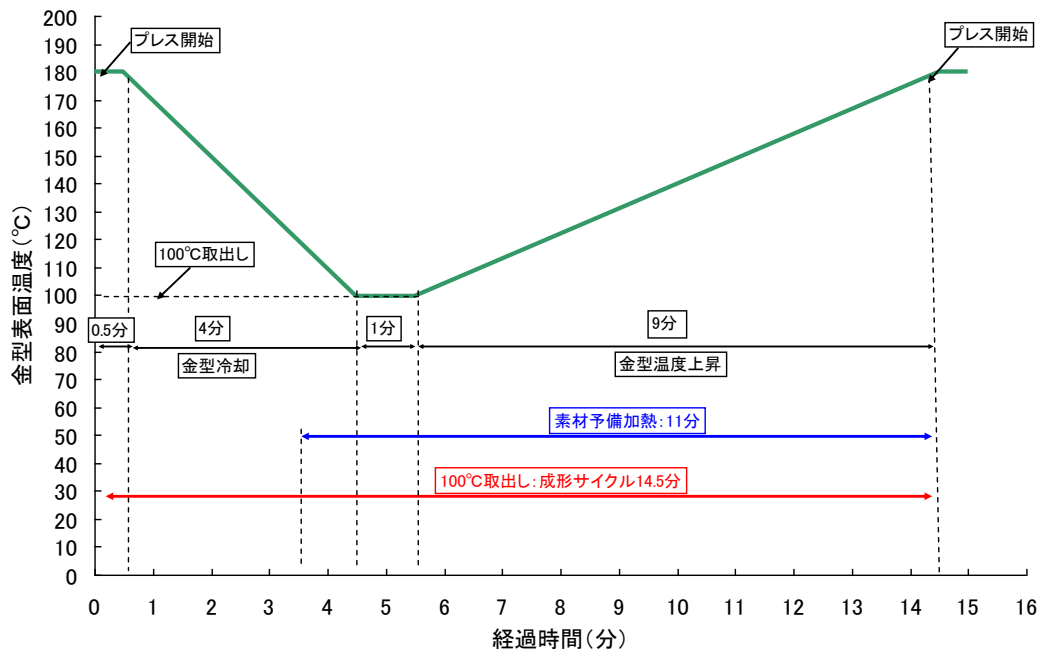


図 2-1-1-17 ブレードフロント金型 成形サイクル調査

ブレードRR改造後成型型 型成形サイクル(天龍コンポジット冷熱システム)

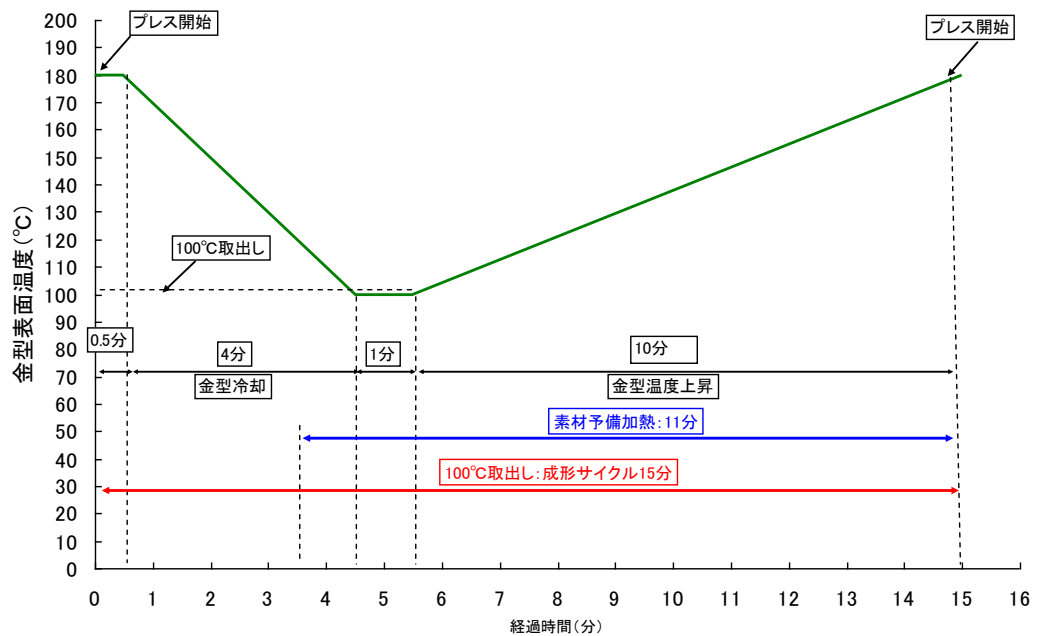


図 2-1-1-18 ブレードリア金型 成形サイクル調査

これらの調査により成形品を 100°Cで取り出した場合、目標である生産性 30 枚/日 (15 分/枚) を達成することができた。

2-1-2 プレス成形方法の確立

中空構造体に適した熱可塑性 CFRP の選定をするために、平板の試験片を作製し、物性評価を実施して、樹脂系の選定、基材構成、断面形状を設計するための基礎データを得た。成形されたブレードが熱硬化性 CFRP と同程度の剛性を維持するためにカーボン繊維基材の構成を確認し、物性評価を行いながら、成形方法の確立を図った。

プレスにより成形した積層板の強度、弾性率低下の原因究明のため、試験片の断面を顕微鏡観察した。

1) 物性評価

(a) 試験片

物性評価試験に使用した 6 種類の試験片の材料（組合せ）及び試験片形状を表 2-1-2-1 に示す。6 種類の試験片の内訳は、現行品 2 種類、熱可塑性 CFRP（シート材）、熱可塑性 CFRP（UD 材）及び熱可塑性 CFRP（シート材）と熱可塑性 CFRP（UD 材）の複合品 2 種類である。

表 2-1-2-1 試験片形状

No.	規格	材料（組合せ）	繊維方向	成形方法	試験片形状
A-0	JIS K7165 準拠	熱硬化性 CFRP （現行材料）	0°	熱硬化性プリプレグ プレス成形	230mm × 20mm × 1mm
A-90			90°		230mm × 20mm × 1mm
B		熱可塑性 CFRP（UD 材）9Ply	0°	型内加熱 プレス成形	230mm × 20mm × 1.2mm
C		熱可塑性 CFRP（シート材）2Ply	—	型内加熱 プレス成形	230mm × 20mm × 1.2mm
D		熱可塑性 CFRP（シート材）1Ply＋ 熱可塑性 CFRP（UD 材）5Ply＋ 熱可塑性 CFRP（シート材）1Ply	0°	型内加熱 プレス成形	230mm × 20mm × 1.2mm
E		熱可塑性 CFRP（シート材）1Ply＋ 熱可塑性 CFRP（UD 材）4Ply＋ 熱可塑性 CFRP（シート材）1Ply	0°	型内加熱 プレス成形	230mm × 20mm × 1.2mm

(b) 試験条件

JIS K7073 に準拠し、疲労試験機（Instron 製 8802 型）を使用して、引張試験を行った。引張速度は 1mm/min とし、試験片が破断するまでの引張荷重と変位を測定した。引張弾性率の測定には歪ゲージを使用し、歪を測定した。

(c) 引張強度、引張弾性率

引張試験における引張強度、引張弾性率の結果を表 2-1-2-2 に示す。現行品の試験片 A-0、A-90 の引張強度は、873MPa、904MPa であり、UD 材の試験片 B、シート材の試験片 C のそれは、それぞれ約 1444MPa、59MPa、複合品の試験片 D、E のそれは、それぞれ約 695MPa、608MPa であった。UD 材の試験片 B の引張弾性率は約 99GPa であり、カタログ値の 103GPa と同等の引張弾性率の結果が得られ、試験方法の妥当性が確認できた。

現行品の試験片 A-0、A-90 の引張弾性率は 45GPa、複合品の試験片 D、E のそれは、それぞれ 48.5GPa、41.6GPa であり、複合品の試験片 D では、現行品と同等以上の物性値となることが分かった。

UD 材の試験片 B、シート材の試験片 C の引張弾性率は、それぞれ 98.6GPa、4.7GPa であり、UD 材の引張弾性率が最も大きく、シート材のそれが最も小さくなった。また、複合品の試験片 D の引張弾性率は、最終目標値である 55GPa に比べ、9 割の弾性率を達成することができた。また、現行品のそれと比べると同程度であった。

表 2-1-2-2 試験片の引張強度、引張弾性率

No.	A-0	A-90	B	C	D	E
引張強度 (MPa)	872.8	903.8	1444.4	58.7	695.2	607.8
引張弾性率 (GPa)	45.0	44.9	98.6	4.7	48.5	41.6

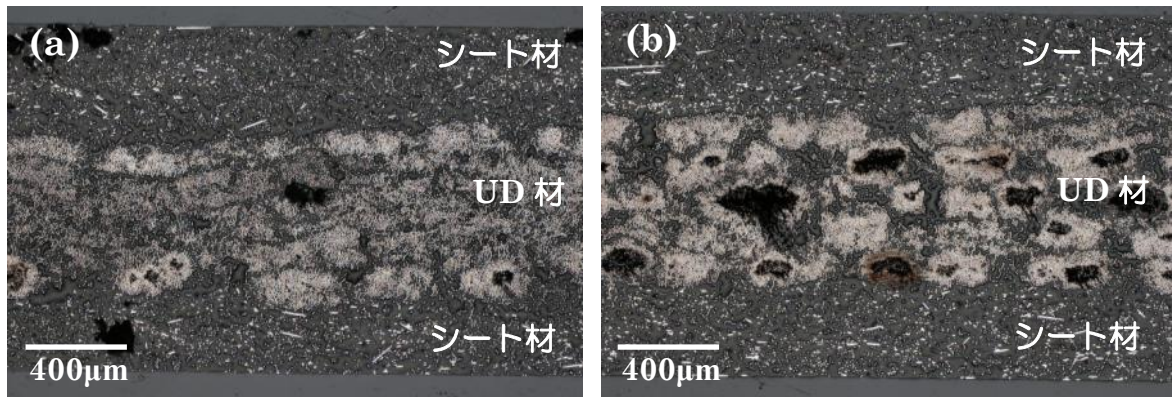


図 2-1-2-1 断面観察写真 a: 強度、弾性率が大きかった試験片 D1
b: 強度、弾性率が小さかった試験片 D2

(d)内部構造観察

プレスにより成形した D 試験片を試験片の長軸方向に対し垂直に切り出し、エポキシ樹脂に埋め込んだ。その後、表面の研磨を行い金属顕微鏡（ニコン製 LV-UDM）にて、試験片断面の顕微鏡観察を行った。試験片 D の金属顕微鏡観察写真を図 2-1-2-1 に示した。

図 2-1-2-1 (a)より、試験片 D1 はシート材部分にポイドの存在が認められるが、UD 材部分のポイドは少なく、CF 束はシート内に均一に分布していることがわかる。このため引張強度、弾性率が大きくなったと考えられる。

図 2-1-2-1 (b)より試験片 D2 は、UD 材の CF 束が大きくなっており、CF 束の中に大きなポイドが数多く観察できる。また CF は均一に分布せず、塊で存在していることがわかる。このため引張弾性率、引張強度が小さくなったと考えられる。

熱可塑性 CFRP のプレス成形において高い物性値を達成するためには、CF 束が均等に分布し、ポイドが少ないプレス条件で成形することが必要である。

(e) 分光器による接合部評価

UD材とシート材の接合は、ともに同じ樹脂 PA6 を用いているが、完全に溶融混合して接合するものでないため、射出成形のウエルドのように界面で一体化しない怖れがある。外見上は一体化しているように見えても、接合界面で樹脂高分子が絡み合わず分子レベルでは結合していないため、強度が低い。したがって、接合界面が分子レベルで一体化しているかどうかを検査することは重要な課題であるが、現時点で確立された方法はない。さらに、本研究開発で使用したUD材とシート材の接合は、ともに同じ樹脂 PA6 を用いているため、その評価が困難である。

そこで、今回使用した樹脂 PA6 が結晶性樹脂であることに着目して、結晶化の程度に差が生じているか、否かにより界面での一体化の状態を評価する方法を適用してみた。樹脂は溶融状態から固化する場合、固化の速度により結晶化の程度が変化することが知られている。したがって、UD材とシート材が界面で異なる状態で固化したかどうか、接合界面両側での結晶化度の差を評価することで評価できる可能性がある。従って図 2-1-2-2 に示すような分光装置を用いた。レーザー照射し、試料から散乱した光を分光器で波長ごとの強度に分けてスペクトルを得た。

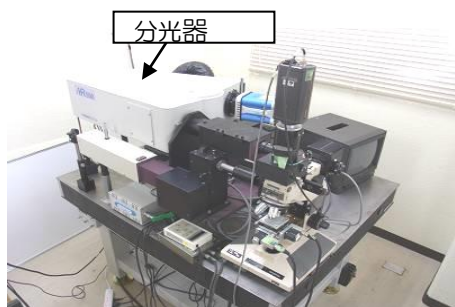


図 2-1-2-2 分光装置

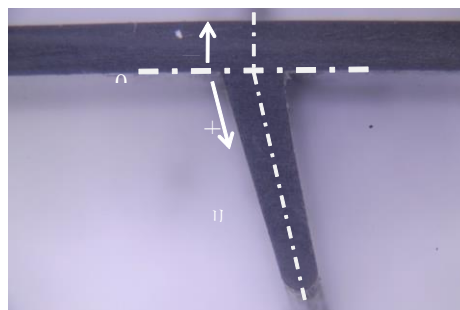


図 2-1-2-3 分光スペクトル測定サンプルおよび位置

実際の翼ブレードがからリブを含むように切り出した図 2-1-2-3 に示す断面を、接合面をまたぐようにUD材（スキン側）とシート材（リブ側）の分光スペクトルを測定した。実際の翼ブレードに使用されている材料は、着色のため顔料が含まれていることから、先の予備試験に比べノイズの大きい S/N の悪いスペクトルとなっている。図 2-1-2-4 に得られた結果を示す。図には、接合界面を0位置とし、UD材（スキン側）とシート材（リブ側）の半値幅の位置による変化を示してある。スペクトルの S/N が悪いため、得られた半値幅にバラツキが大きいものの、図 2-1-2-5 よりわかるように、接合界面を挟んでUD材（スキン側）とシート材（リブ側）の半値幅に大きな差は認められない。このことより、両材料は節後部において、分子レベルでのミスマッチはないものと考えられた。

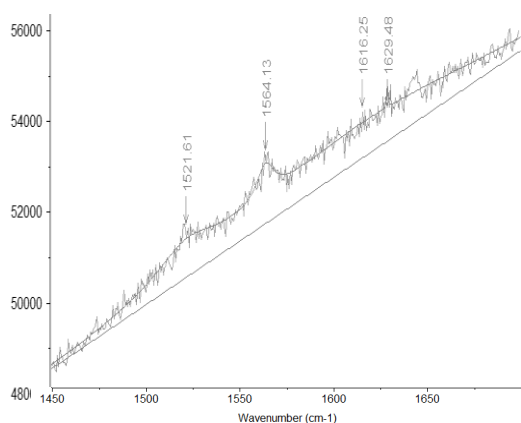


図 2-1-2-4 翼カットサンプルの分光スペクトル

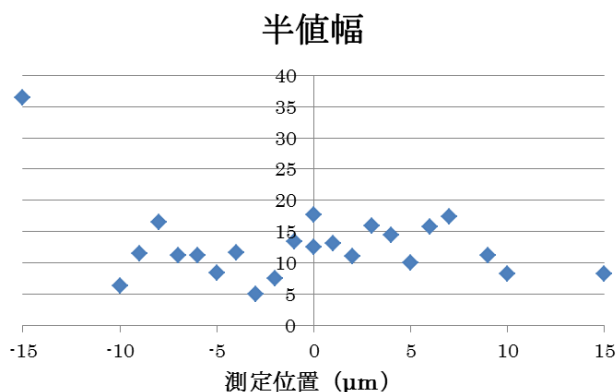


図 2-1-2-5 接合面周辺の樹脂スペクトルの半値幅の変動

2-2 同部材接着技術の確立

2-2-1 レーザーによる接合手法の確立

試作成形した熱可塑性ブレードを導入したレーザー溶接システムを使用して溶着を行った。
図 2-2-2-1 に導入したレーザー溶接システムの全体を示す。

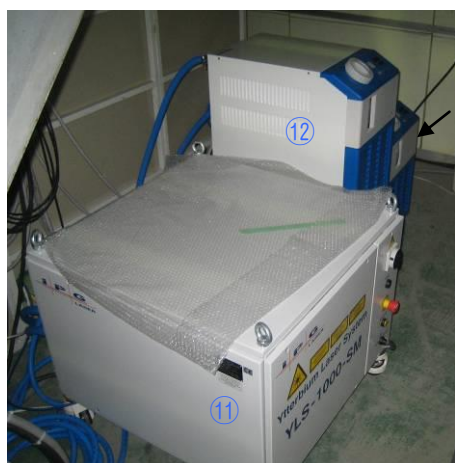


図 2-2-2-1

- ① デンソー製 6軸ロボット (VS-087)
- ② 溶接ワイヤ巻取り装置
- ③ ワイヤ供給装置
- ④ CCDカメラ用モニター
- ⑤ ファンクションジェネレーター
- ⑥ シーケンス制御パネル
- ⑦ デンソー製ロボット制御盤
- ⑧ ブレード固定治具
- ⑨ CCDカメラ
- ⑩ レーザートーチ
- ⑪ レーザー発振装置 (IPG ファイバーレーザー YLS-1000-SM)
- ⑫ レーザー発信装置冷却チラー
- ⑬ レーザートーチ冷却チラー
- ⑭ 変圧トランス



図 2-2-2-2 レーザー溶接状況

これらのレーザー溶接システムを使用して各種基礎実験を実施してブレードの溶接に適用した。レーザー溶接状況を図 2-2-2-2 に、溶接・仕上げ後のブレードを図 2-2-1-3、図 2-2-1-4 に示す。



図 2-2-1-3



図 2-2-1-4

これまでの研究開発により成形された熱可塑性ブレードに肉盛り溶接を実施することが可能となった。

今回のテーマである風力発電用ブレードはリーディングエッジの形状が非常に重要であり溶接ビードがブレードの性能に悪影響を与えてしまうことから溶接ビードの除去作業が発生した。今後は溶接ビードの仕上げ方法の構築、仕上工数減、溶接精度向上の為の研究開発を引続き実施する。

2-3 熱可塑性CFRPブレードの評価

2-3-1 成形ブレードの評価

2-3-2項に述べる。

2-3-2 耐雷性の評価・事業化の検討

ブレードの受雷性に関して、ナショナルコンポジットセンターから評価方法に関するアドバイスを受けながら、試験を実施して受雷ブレードの状態を調査した。雷を模擬した電流は図 2-3-2-1 に示す装置を使用した。小型風車が雷で破損した事象もあることから、今回、直撃雷に対する供試品の受雷後の状況を確認した。雷に対して、大型風車については、IEC61400-24 にて雷に対する試験規格が定められているが、小型風車については、特に規定がなく今回は航空機試験の規格を参考として雷試験を実施した。

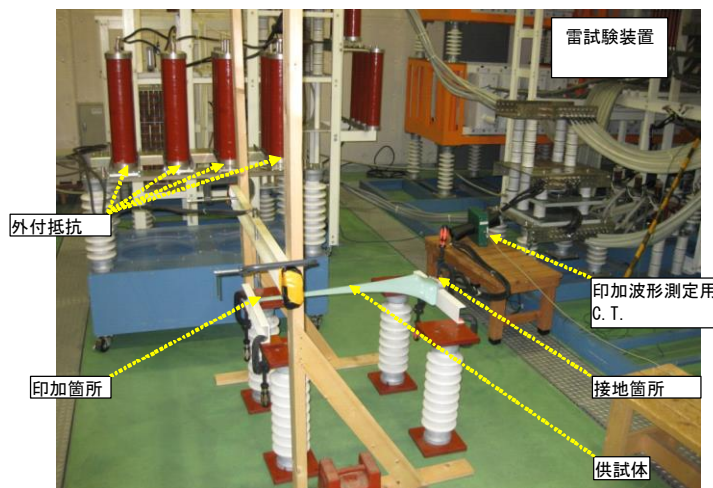


図 2-3-2-1

今回の試験の結果、雷を想定した電撃を受けた試作ブレードは図 2-3-2-2、図 2-3-2-3 の状態となり、実際の落雷を受けた場合も同様状態となることを確認することが出来た。



図 2-3-2-2



図 2-3-2-3

また、本研究で開発された熱可塑性ブレードを事業化する際に必要な性能および強度等の評価を実施した。評価は構造試験、塗膜性能試験、発電性能試験を実施した。構造試験の中に疲労試験、耐候試験、曲げ剛性・破壊試験が含まれる。

構造試験結果を表 2-3-2-1 に塗膜性能試験結果を表 2-3-2-2 に発電性能試験の結果を表 2-3-2-3 に示す。

表 2-3-2-1 曲げ剛性一覧

ブレード	曲げ試験前 印加状況	曲げ剛性 [N/m]	破壊荷重 [N]	破壊時溶着 ビードはがれ	剛性要件 曲げ剛性 250 N 以上	強度要件 破壊荷重 58 N 以上
ブレード 1	耐候性試験	376	101	なし	合格	合格
ブレード 2	疲労試験	406	172	前縁、後縁	合格	合格
ブレード 4	なし	420	120	前縁	合格	合格
ブレード 5	なし	391	85	前縁	合格	合格
ブレード 6	なし	410	140	前縁	合格	合格
現行品	なし	401	142	-	合格	合格

表 2-3-2-2 塗膜性能試験結果

項目/品名	ウタナール (L)
付着性試験	100 / 100
塩水噴霧試験	剥離なし

表 2-3-2-3 各ブレードの性能及び評価

評価項目		発電性能			評価	
		現行	試作 ACF	試作 BDE	試作 ACF	試作 BDE
カットイン風速		2.5 m/s	3.0 m/s	3.0 m/s	+0.5 m/s	+0.5 m/s
基準出力		868 W	841 W	849 W	-3.2 %	-2.2 %
定格風速		12.0 m/s	12.5 m/s	12.5 m/s	+0.5 m/s	+0.5 m/s
最大出力係数		0.46	0.42	0.42	-8.7 %	-8.7 %
推定年間 発電量	年平均風速 3.0 m/s	254 kWh	209 kWh	220 kWh	-17.8 %	-13.4 %
	年平均風速 3.5 m/s	441 kWh	377 kWh	393 kWh	-14.4 %	-11.0 %
	年平均風速 4.0 m/s	689 kWh	606 kWh	625 kWh	-12.0 %	-9.4 %
	年平均風速 4.5 m/s	999 kWh	896 kWh	916 kWh	-10.3 %	-8.2 %
	年平均風速 5.0 m/s	1,360 kWh	1,239 kWh	1,261 kWh	-8.9 %	-7.3 %
	年平均風速 5.5 m/s	1,760 kWh	1,622 kWh	1,645 kWh	-7.8 %	-6.6 %
	年平均風速 6.0 m/s	2,183 kWh	2,031 kWh	2,054 kWh	-7.0 %	-5.9 %

今回の評価試験結果から試作ブレードは剛性及び強度試験において、良好な結果を示した。また、塗膜性能も現行品と同じ塗料であるウタナール（L）は付着性、耐久性共に問題ない。

発電性能については、低風速時（風速 6.0m/s 以下）において試作ブレードの性能は現行品に比べ一割程度低いが、高風速時（風速 11m/s 以上）においては現行品と同等の性能が見込める事が確認できた。

第3章

全体総括

熱可塑性材料を使用した3年間の研究開発を通して、今回のテーマである小型風力発電用のブレード形状に於いては材料の予備加熱、金型昇温、冷却に係る温度制御の検討を実施し熱可塑性材料をプレス成形する際の条件を把握することが出来た。また小型風力発電用ブレードの形状に適した材料選定、積層構成構築、断面形状設計を行いながらプレス成形方法を確立しハイサイクル成形技術の開発を行った。これらの結果熱可塑性材料を用いたブレードプレス成形は目標である成形サイクル（30 枚/日）を達成し、材料価格を除いたコストダウンも可能となった。

また、導入したレーザー溶接システムを使用して様々な接合条件の検討を行いレーザーによる同部材接着技術を確立することが出来た。

これらの研究開発により製作された小型風力発電用ブレードは物性、性能面では概ね製品化も可能なレベルまで達していることを評価試験により確認した。

今回実施した小型風力発電用ブレードの研究開発では、製造過程における問題点も確認されている。主な問題点として、成形されたブレードを溶接する際に溶接ラインの位置ずれ、ブレード溶接後の溶接ビードの仕上げ、が挙げられる。ブレードのレーザー溶接では溶接ラインの微量のズレがその溶接性を大きく左右することが今までの研究からわかっている。従って現状は予めプログラムされた溶接ラインにブレードの溶接ラインが適合せずに個々にティーチングを行いプログラムを微修正している。また溶接時に形成された溶接ビードはブレードの発電性能の低下に大きく影響してしまうため手作業で除去している。

今後はこれらの問題点の解決のために補完研究を実施してブレードの成形精度の向上、溶接時の固定治具を再検討、また溶接後の仕上げ作業を低減させる為の手法を確立するとともに同部材のCFRPレーザー接合技術の更なる研究開発に取り組む予定である。

今回の研究開発で採取した様々な基礎データを活用していくために、材料コストの動向にも注視しながら熱可塑性CFRPの市場のニーズ調査も合わせて行っていく予定である。