

特集 進化する複合素材

CFRPにおける総合エンジニアリングへの取り組み

＜バーチャルとリアルを融合した検討による開発の高度化と効率化＞

株式会社テクニカルリサーチ 高原 忠良・永洞 和宏・堀内 亮平
蓮井 翼・後藤 征也

1. はじめに

低炭素社会を実現するための主要手段のひとつとして炭素繊維強化樹脂（CFRP）の利用拡大が想定される。すでに、クリーンエネルギーである風力発電のブレード、燃料電池自動車の高圧タンク、あるいは、航空機や自動車といった輸送機器の軽量化部材として活用が広がりつつある。CFRPはその材料構成上、極度の異方性を示すとともに、マトリクス樹脂の含浸方法やCFの積層方法により、成形加工法も多岐に渡る。このため、異方性を考慮した設計、構成する材料特性の理解、適切な成形加工法の選択、成形品の試験評価や解析等、広範囲に渡る知見が必要とされる。専門性の高いCFRPに関しては既に多数の専門業者が活躍しており、当社としても各社との協業を進めている。

CFRPの活用拡大や開発速度UPを考えた場合、専門性の高い各アイテムの俯瞰的、総合的なエンジニアリングが重要となる。

株式会社テクニカルリサーチは、CAEの受託解析専門企業として設立し30周年を迎える。現在は各種のオリジナルの計測法もビジネスコアとしており、CAEと計測、すなわち、バーチャルとリアルを両輪とした技術コンサル企業として活躍している。この特色を生かし、CFRPの総合エンジニアリングによる低炭素社会に向けての持続的開発に貢献することをも目指している。

本稿では、総合エンジニアリングの取り組みを説明するとともに、成形品開発や評価への適用例を紹介する。

2. 総合エンジニアリング

平板特性評価検討を例として具体的に説明する。取組内容は以下である。

- 試験片作製
- 引張・曲げ試験
- 試験時のひずみ進展挙動の観察把握（光ファイバ計測システムにて）
- 試験後クーポン片内部の損傷観察（3次元超音波探傷システムにて）
- 試験時挙動や損傷状況の技術的考察
説明に先立って、適用した当社のオリジナル技術を紹介する。

2-1 オリジナル技術

(1) CAE

CFRPの設計や成形品内部挙動の考察への適用を想定しており、ごく一般的な積層理論・複合則主体のマクロ解析である。強度や損傷挙動検討は破壊則ベースでの解析となる。解析用材料物性が公表されていない場合やオリジナル材の場合は、JIS等に則り、積層角度違いの3種のクーポン試験片を製作し物性計測から解析用パラメータを決定している。

(2) 光ファイバ計測システム⁽¹⁾⁽²⁾

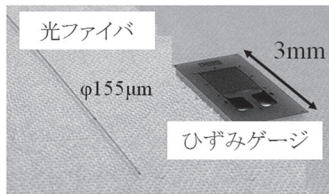
広範囲に温度とひずみの同時計測可能な計測システムFBI-Gaugeを活用している。光ファイバをセンサとして使用する計測技術である。

第1図に機能と原理の概要をまとめる。本システムの活用によりこれまで確認が困難であった各種事象の解明が可能となってきている。射出成型への適用事例⁽³⁾では、射出中の型内の温度とひずみを同時計測することで型内現象を明らかにしている。計測結果の考察の際は流動解析（3D-TIMON[®]）と構造解析（Abaqus）を組み合わせて検討することで原理原則から解釈が可能となった。

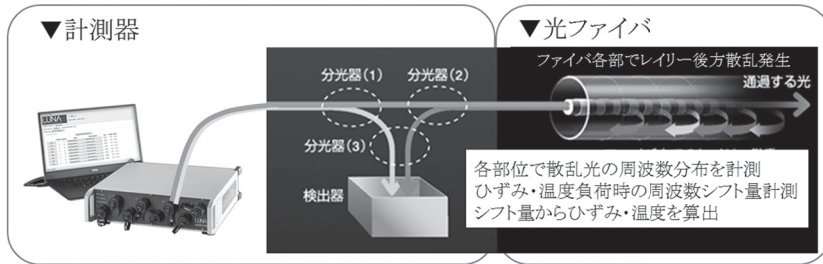
CFRPへの適用においては、積層内に光ファイバを設置することで、温度やひずみの積層方向での分布も計測できる。硬化の際の温度やひずみをモニタ

することで、温度分布による硬化度分布の推定や、残留ひずみの計測も可能となる。第2図は適用実績のイメージである。

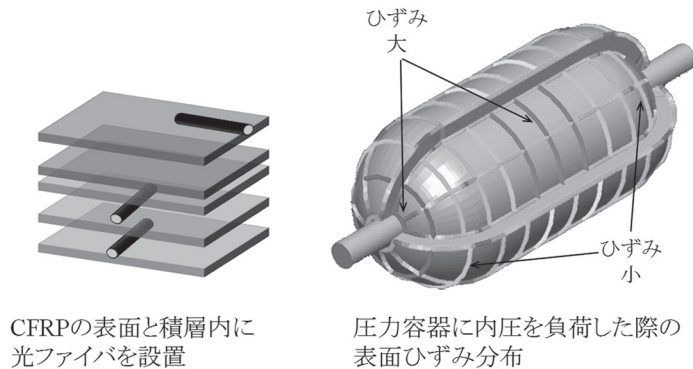
第3図は、光ファイバにより計測した引張試験のSS特性である。試験片はJIS K7019相当(±45°積層試験片)で、光ファイバを表と裏に3本ずつ平行



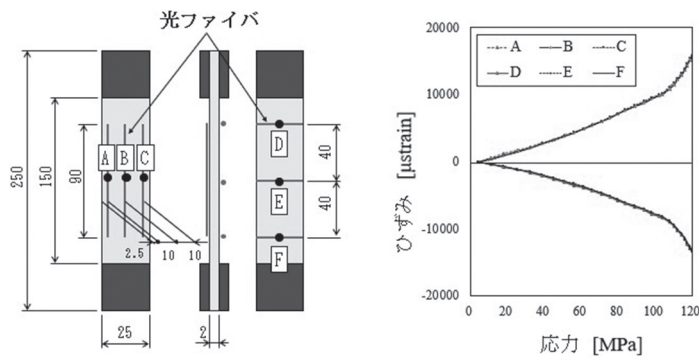
- ▶ 最小 0.65mmおき
 - ▶ 最長 50m
 - ▶ 最速 毎秒250回
 - ▶ 同時に最大8本のファイバ
- ひずみ and/or 温度 の計測



第1図 光ファイバ計測システム FBI-Gaugeの特徴と計測原理



第2図 光ファイバ計測システム活用実績(イメージ)



試験片形状と光ファイバ貼付け状況

第3図 光ファイバによる±45°試験片のSS特性計測

に、かつ表裏で直交するように貼付した。このため、表側（引張方向）では引張ひずみが、裏側（引張直交方向＝幅方向）では圧縮ひずみが計測されている。光ファイバの全域で計測しているが、その中から各ファイバの中央位置（図の●）の計測値、計6点をプロットしてある。クーポン試験片であり、表裏の各3点はほぼ同等のひずみ値となることが確認できる。また、±45°試験片特有の非線形性を示している。

(3) 超音波探傷計測システム⁽⁴⁾

第4図は計測システムDolphiCam2の概要である。30 mm角の平面プローブ表面には約1万6,000個の振動子が2次元配置されている。プローブをCFRPに面接触させるだけで30 mm口のエリアのリアルタイム探傷が可能となる。連続的に接触させること

で広範囲の探傷も可能である。CFRP内部の剥離状況（深さ位置と面積）は3D可視化が可能であり直感的に把握できる。詳細観察の際には後述の計測例で示すように任意の断面画像（Bスキャン）にて検討する。

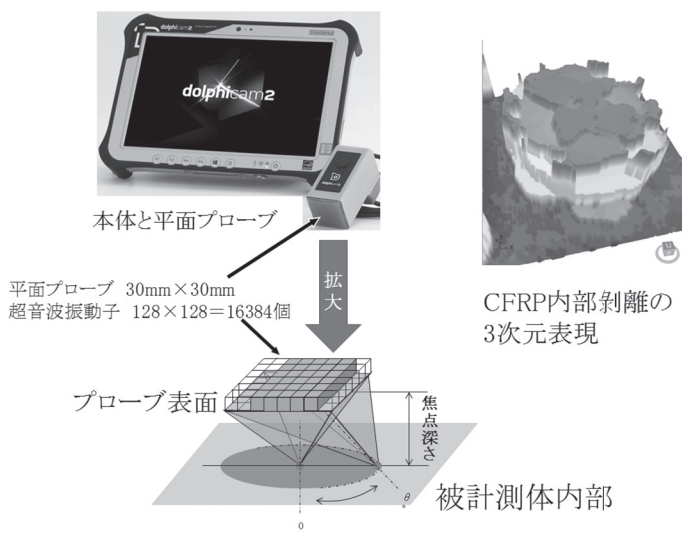
2-2 総合エンジニアリング

ついで、CFRPの一般的な開発フローに沿って総合エンジニアリングを紹介する。

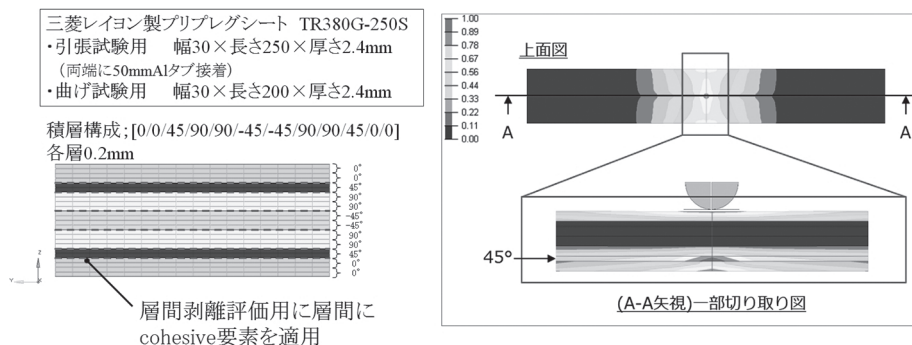
(1) 構想、設計

本紹介例では材料試験とその試験片の損傷状況の観察が目的であったため、材料物性が公開されている市販のプリプレグシートを選定した。

試験片は、超音波探傷プローブのサイズ30 mmに合わせた幅とし、当社所有試験機（島津製作所社製万能試験機AG-X plus 100kN）の最大荷重以下で破



第4図 超音波探傷システムDolphiCam2の概要



第5図 設計した試験片仕様と、3点曲げでの破断予測解析例

断可能な厚みとすることを制約条件として設計した。破壊則としては、曲げ試験（引張・圧縮応力）を考慮しHoffman則を選定し、層間剥離も想定されたためChang-Chang則を併用した。第5図は設計した試験片仕様と、代表的な条件による3点曲げでの破断予測解析結果である。

(2) 試作

目的に合わせて協業先と加工方法を選定している。本検討は理想試験片での実験が必要でありオートクレーブ硬化とした。試作品質はポイド率が許容以下であることを確認して担保している。実測密度と理論密度を比較確認するといった簡便な方法とともに、必要の際は、前述の超音波探傷システムやX線CT観察にて定量化している。

(3) 評価 ー引張・曲げ試験とFS特性ー

引張と3点曲げ試験にて評価した。結果の詳細や考察に関しては後述する。

(4) 評価 ー超音波探傷による損傷状況特定ー

試験後の引張試験片側面には両側ともに全域に渡るクラックが観察されたが、内部剥離範囲等の詳細は不明であった。第6図は超音波観察結果である、試験片全域の剥離コンター図（表層からの深さ位置で色分け表示）からは側面端部から1/4の位置では長手方向全域で剥離は生じていないことが観察されている。また、数カ所の代表的な断面画像を示すが、表面から0.6~0.7 mmの位置での剥離を呈している。第5図に示す積層構成から、45°層と90°層の界面での剥離と考えられる。

(5) 現象検討、考察

ここまでの各種の計測・観察やCAEを組み合わせて総合的に検討することで、現象の考察が容易となる。

第7図左は3点曲げ試験の、FS特性・超音波観察・CAEを総合した検討である。考察の詳細は割愛す

るが、同図右に示すような積層間あるいは積層内での破壊の進展挙動が推察できる。

3. 応用例、適用例

前述の総合エンジニアリングの応用や個別テーマでの深掘りの例を紹介する。

3-1 高圧タンクのFW積層パターン検討へのCAEの適用

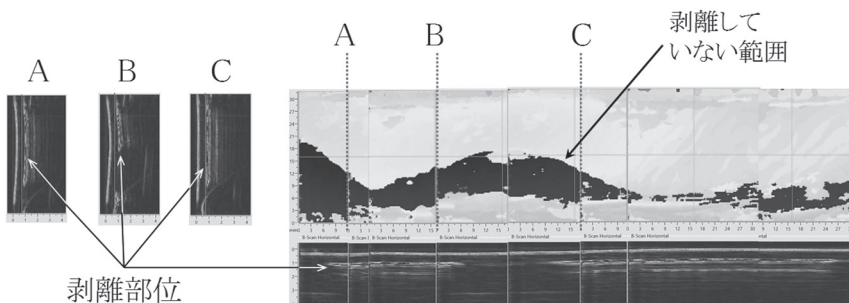
タンク設計において、高価なCF使用量を最小とすることは軽量化にもつながり重要な検討点である。第8図はタンク先行検討において、胴体相当の円筒モデルでFWパターンの強度への影響を検討した例である。厚み構成一定の条件において、積層角度の組み合わせによる破断への影響が確認できる。積層パターンによる破断位置・荷重の予測が可能である。材料物性を仮想的に変更した検討も可能である。強度検討のための材料試作やタンク加工、さらに破裂試験は、かなりの期間と費用を要するため、CAEによるサーベイが重要となる。

3-2 FW加工品の高精度形状計測

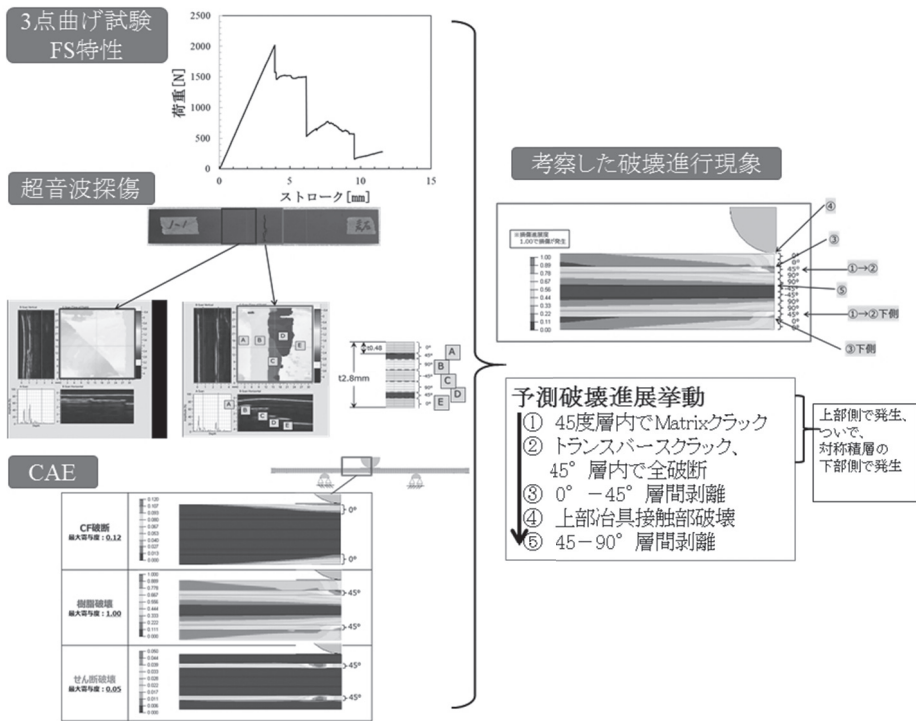
設計通りの加工となっているかの確認は重要である。特に、高圧タンクのように特性限界で使用する場合は加工品のFW巻き上がり検討が重要となる。第9図は光切断法による高精度3D計測の事例である。FW加工条件として、TPP（CFRPのテープ）を1本おきとした設備能力検討品の計測である。テープの位置や段差（厚み）等が、数十 μm の精度で計測可能である。STL形式での出力も可能であり、計測形状をベースとした構造解析もシームレスに対応できる。

3-3 VaRTM成形時の樹脂含浸挙動の研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾

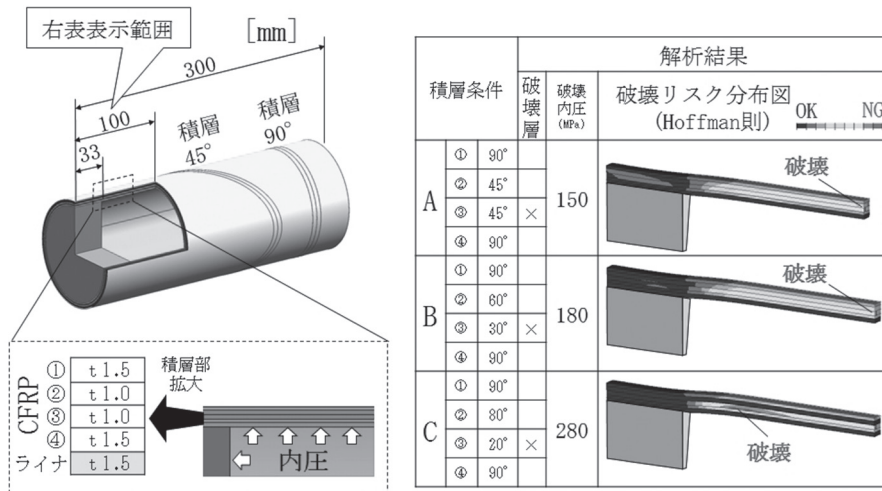
大学での研究に活用頂いた応用例である。VaRTM



第6図 超音波探傷システムDolphiCam2での計測例



第7図 各種検討を組み合わせて検討した3点曲げ時の破壊進展



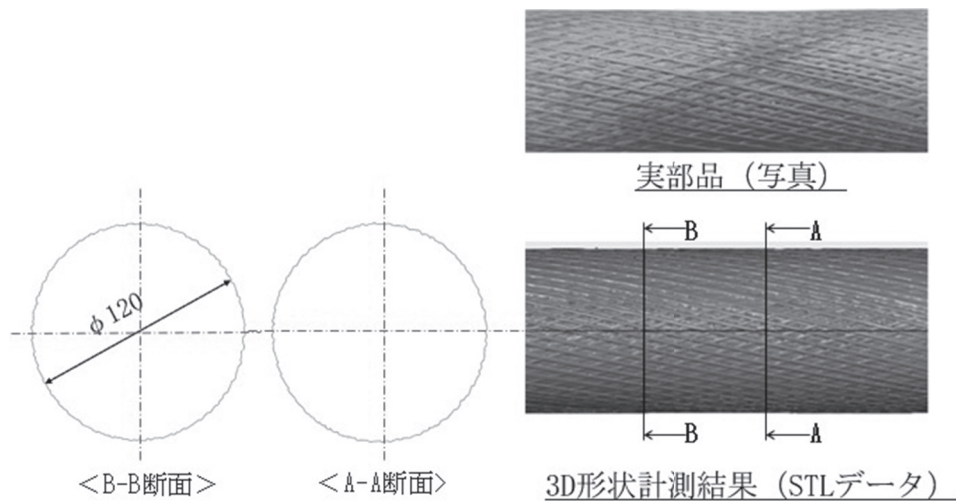
第8図 CAEを活用したFWパターンの検討例

成形のCAEに際しては浸透係数が必要となるが、型内現象の浸透挙動の定量的な計測は困難であった。本研究では注入する樹脂と型の温度差に着目し、上型・下型の表面にファイバを設置し温度の変化挙動から樹脂の流入先端位置を検知することを試みた。第10図は、型断面での概要説明図と、計測した流動

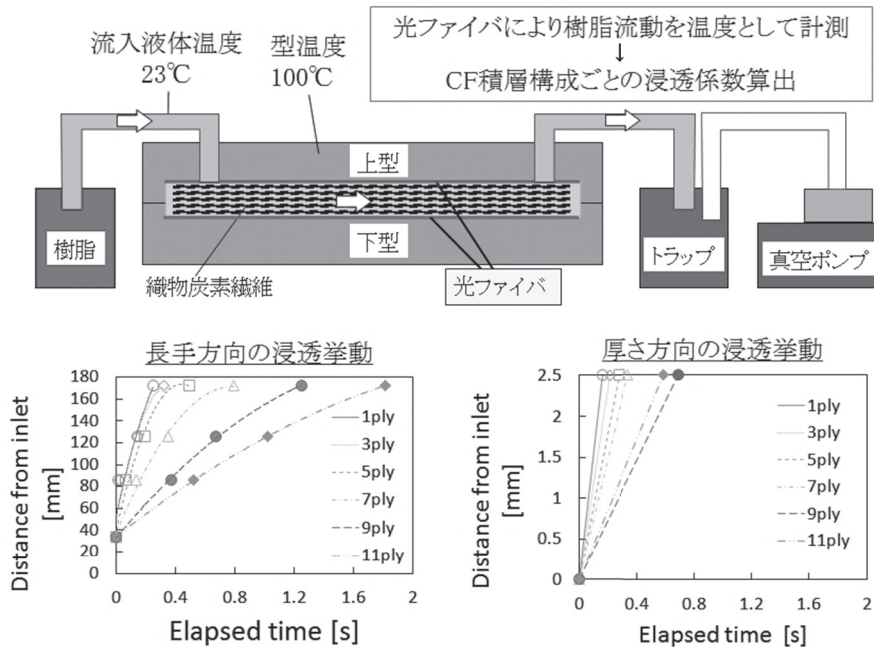
挙動である。型内に配置する炭素繊維シートの枚数に依存すること、さらに枚数の影響が非線形的挙動となることを解明した。

3-4 開発効率化のためのAIの活用

冒頭で概説したように、CFRPの設計に際しては、繊維・樹脂の物性の影響、繊維の配向と各層の厚さ



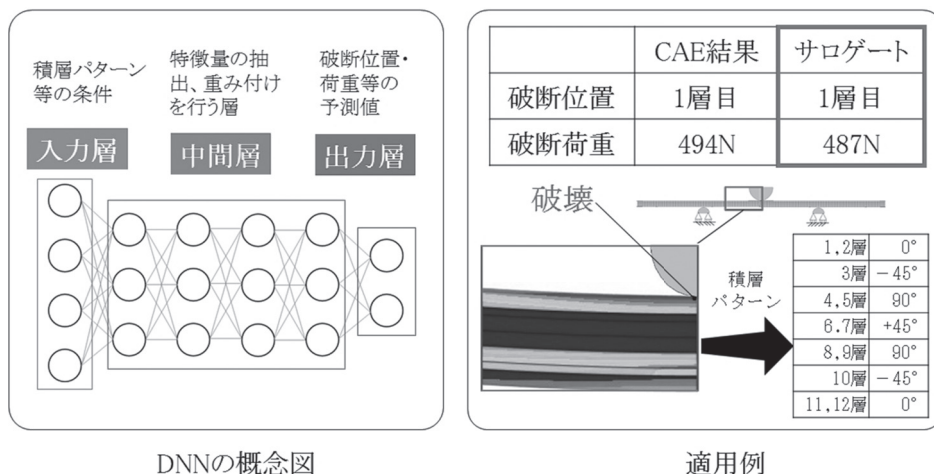
第9図 FW加工品の高精度3D計測例



第10図 VaRTM成形の樹脂浸透挙動定量化のために光ファイバを適用した事例

など多角的な検討が必要となり、仮にCAE主体で検討できたとしてもそのコストや期間は相当なものとなる。このためAI手法による効率化を進めている。蓄積してきたCAEの結果を教師データとしてのDNN (Deep Neural Network) によるサロゲート手法での予測モデルの構築例を紹介する。第11図にDNNの概要図と検討例を示す。構築したモデルは、12層の各配向角度が3点曲げ試験の破断位置と荷重にどの

ように影響するかを予測するものである。CAEと同等の予測精度が確認できた。DNNモデルは $y=ax+b$ のような非常に低コストな計算の繰り返しでありわずか数秒で予測可能である。一方、CAEによる検討は数日から数週間を要する。AI手法によるアプローチは極めて重要と言える。モデルのさらなる拡張として、材料特性を織り込んだモデルの検討を進めている。



第11図 AIを活用した検討の例

4. おわりに

当社では、専門性の高いCFRPの開発を支援する狙いで数年にわたり技術蓄積を進めてきた。蓄積した各種の計測技術やCAE手法を組み合わせ、さらに俯瞰的に検討するという総合エンジニアリングとして推進、拡大中である。この取り組みにより、開発検討や現象解明が容易になるなどの効果も表れている。特にCAEの活用は開発効率化への寄与が大きい。また、AIへの取り組みも紹介したところであるが、劇的な期間短縮が狙える活用も見えてきた。

今後のさらなる取り組みとしては、AI適用対象の探索と定着化、損傷進展解析・マルチスケール解析といったよりリアルに則した解析手法の拡充、光ファイバ計測システムFBI-Gaugeなどの新計測法の紹介と適用拡大を予定している。

急速な活用拡大が想定されるCFRP開発への貢献を目指す技術コンサル会社としてSDGs対応も見据えながら各社の開発、技術検討の支援を図るため、さらなる進化を目指している。

<参考文献>

- (1) 富士テクニカルリサーチ
HP: https://ftr.co.jp/solution/hardware/fbi_gauge/
- (2) 高原忠良: 光ファイバ計測システム「FBI-Gauge」の自動車分野での最新活用状況、自動車技術会 テスティングツール最新線2020, p.16 (2020)
http://guide.jsae.or.jp/first_column/276369/
- (3) 高原忠良: 光ファイバセンサによる温度・歪計測システムの金型への適用、型技術 Vol.35, No.2, p.22 (2020)
- (4) 富士テクニカルリサーチ
HP: <https://ftr.co.jp/solution/hardware/dolphicam2/>
- (5) 浅井宏斗・瀬戸雅宏・田中宏明・山部昌: VaRTM成形中の樹脂含

- 浸挙動評価に関する研究 第1報、成形加工'18, p.85 (2018)
- (6) 浅井宏斗・瀬戸雅宏・田中宏明・山部昌: VaRTM成形中の樹脂含浸挙動評価に関する研究 第2報、成形シンポジウム'18, p.103 (2018)

【筆者紹介】

高原忠良

株式会社テクニカルリサーチ 西日本営業部
事業開発室 室長

■連絡先

〒460-0008 愛知県名古屋市中区栄5-28-19
TEL: 052-269-1321 FAX: 052-269-1322

永洞和宏

株式会社テクニカルリサーチ 本社技術1部
部長

堀内亮平

株式会社テクニカルリサーチ 先端技術開発部
先端技術開発室 グループリーダー

蓮井 翼

株式会社テクニカルリサーチ 本社技術1部
E&S1室 主任

後藤征也

株式会社テクニカルリサーチ 本社技術1部
E&S2室 主任