炭素繊維強化プラスチックの成形力学[†]

水口 周*

Process Mechanics of Carbon Fiber Reinforced Plastic

by

Shu MINAKUCHI*

この度、複合材料部門委員会より寄稿の機会をいただきましたので、私の研究テーマの一つである炭素繊維強化プラスチック複合材料の成形力学に関して、これまでの研究遍歴を簡単にご紹介させていただきます。

私は大学院の修士課程および博士課程においては、高強度複合材表皮で軽量ハニカム心材を挟んだサンドイッチ構造を対象として、ハニカムの構造周期性に基づいた損傷のモデル化や光ファイバひずみセンサを用いた損傷検知、形状記憶合金ハニカムを用いた損傷抑制についての研究を行っていました。ちょうどその頃、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が真空圧樹脂含浸成形法(VaRTM)による航空機複合材主翼構造実証のプロジェクトを実施していました。この成形法は、乾式繊維シートを積み重ねた後に樹脂を注入し、オープン内で加熱して樹脂を固めるのですが、所属研究室のメンバーがこの成形過程において複合材構造内に発生するひずみ分布を埋め込み光ファイバで計測する目的でプロジェクトに参画していました。私が博士課程で対象としていたのが、損傷発生という単一の現象であるのに対し、成形過程は樹脂含浸、加熱、硬化、冷却の各段階で様々な現象が計測できる可能性があり、まだまだ課題の多い複合材料のものづくりに役立ちそうなデータが得られていました。複合材料に埋め込むことが出来るという光ファイバセンサの特徴を最大限生かすことのできる、将来性のある興味深い研究テーマであると感じていました。

その後、2008年から大学に職を得たのですが、JAXAで実施していたプロジェクトに類似した小型のプロジェクトがオーストラリアの研究機関と共同で立ち上がり、参加させていただくことができました。1メートルサイズの複合材料構造をオーストラリアで成形したのち、その供試体を日本に持ち帰って荷重をかけて壊すという一連の実証試験を実施したのですが、大量の計測装置をオーストラリアに輸出し、複合材料の成形から破壊までのひずみ分布の変化を連続計測することに成功し、いわゆる、ライフサイクルモニタリングを初めて実用的な形で実証することが出来ました。

一方で、こうした複合材成形モニタリングに取り組むようになって気付いたこととしては、樹脂がガラス

化した冷却過程においては大きなひずみ変化が計測される一方で、成形過程の主要な現象である、樹脂が硬化していく状態において計測されるひずみは $100\mu\epsilon$ 以下と極めて小さいということでした。本来樹脂が硬化すると数%の体積収縮が起きるはずですが、他の論文を見ても同様の結果が示されており、その頃は理由も良く分からず、クリアなデータが得られる熱ひずみに起因する変形や応力に関する研究に注力していました。

そうしたなか、今度は航空機メーカーと樹脂の硬化過程について共同で研究を行う機会に恵まれました。複合材料に応力が発生し始めるゲル化(樹脂が液体から固体に相変化する点)のタイミングを埋め込み光ファイバで捉えたいということでした。企業の方が持つ技術に対する鋭い視点など大変勉強になる一方で、難しいのではと感じながら実験を行っていましたが、ある時に作業を担当していた学生が実験に失敗した際に、硬化収縮によるひずみをはっきりと捉えることができたのです。複合材料は一般に内部の空孔を抑制するために、真空バッグのなかで脱気された状態で成型型の上で加熱硬化されますが、この真空バッグが破れてしまったのでした。本来であれば、ここで実験停止となるのですが、真空バッグが破れたのが加熱途中ということもあり最後まで実験を継続したところ、硬化収縮による $5000\mu\epsilon$ 程度のひずみが計測されました。その後の検証の結果、これまでわずかなひずみしか計測されなかったのは、成形中に複合材料に負荷される力学拘束が原因であることに気づきました。そこで、新たにこの拘束状態を制御しながら、複合材料の3次元的な硬化収縮ひずみを計測する手法を確立し、実成形環境下での変形挙動を明らかにすることが可能になりました。また、この変形挙動を再現することの出来る、成形シミュレーションの新しい枠組みを提案・実証しています。

こうして振り返ってみますと、月並みではありますが、自分とは違う経験や視点を持った方々とのコラボレーションと失敗に恵まれることの大切さを実感します。ますます様々な用途に適用が広がっていくことが期待される炭素繊維強化プラスチックですが、これからもこうしたチャンスを逃すことなく、次世代の複合材料技術の構築に貢献していきたいと考えています。

[†] 原稿受理 令和3年2月13日 Received Feb. 13, 2021 ©2021 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 東京大学工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 Graduate School of Engineering, the University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656.