

氏 名	小林 良之
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	理工博 第 179 号
学位授与の日付	平成 27 年 3 月 25 日
課程・論文の別	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題名	長期高温暴露が炭素繊維強化プラスチックの損傷挙動および 残留機械特性に及ぼす影響（英文）
論文審査委員	主査 准教授 小林 訓史 委員 教授 若山 修一 委員 准教授 高橋 智

【論文の内容の要旨】

航空宇宙産業では高分子複合材料の使用が増大しており、最新のボーイング 787 型機において構造重量の 5 割に適用されるに至っている。経済性の観点からの重量低減の要求は、従来では金属部品が使用されていたエンジン周辺等の高温部材の複合材化につながっている。このような用途に用いられる高分子複合材料としては炭素繊維／エポキシ樹脂複合材料が一般的である。一方で将来の開発が期待されている超音速輸送機においては、過去の検討例から機体表面の外板温度が 180℃付近もしくはそれ以上となることが判明しており、エポキシ樹脂に替わる耐熱樹脂を用いた複合材料の構造部材への適用が必須となる。さらに機体は長期間運用されることから、長期間に及ぶ高温環境下における暴露が複合材料に及ぼす影響を把握する必要がある。複合材料の耐熱性は使用される樹脂の耐熱性により支配される。樹脂の耐熱性を示す指標のひとつにガラス転移点温度がある。材料のガラス転移点温度は 200℃以上が必須であり候補となる材料は少ないが、本研究ではポリシアネート樹脂に着目した。ポリシアネート樹脂は従来使用されているエポキシ樹脂と同等の良好な成形性を有し、さらに高ガラス転移温度と低吸湿性といった特性を合わせ持つ。そのため高温時における高い強度保持が期待できる。一方でポリシアネート樹脂は比較的近年開発されてきた樹脂であることから、ポリシアネート樹脂に及ぼす長期高温暴露の影響については不明な点が多い。また本樹脂を用いた炭素繊維強化プラスチック（CFRP）については、長期高温暴露時に発生する CFRP 特有の熱酸化劣化機構による損傷挙動及び材料特性への影響が予想されることから、その影響を明らかにする必要がある。一方で従来航空機の開発においては、ビルディングブロックアプローチによる機体開発手法が取られていることから、候補となる材料の選定においては、繊維配向方向の違いによる機械特性の変

化を調査する等の複合材料に特有の評価方法が必要となる。また機体設計時に必要となる長時間暴露後の残留強度は設計時における重要な材料特性である。過去の研究において、長期高温暴露時の熱酸化劣化機構により、酸化劣化の進展が繊維方向へ顕著に進むことが一方向複合材料の結果から判明している。しかしながら酸化劣化の進展が機械特性へ及ぼす影響については不明な点が多い。また従来の研究例においては、数種の機械特性のみを実験により評価するといった研究例が多く、ひとつの材料について包括的に試験を行い、各種機械特性に及ぼす熱酸化劣化の影響を評価した研究例は少ない。さらに材料の長期耐久性を評価するにあたり、その評価期間は実運用を想定し評価される必要がある。そのため、候補材料の選定及び最終的な材料評価が長期間となることから、その評価期間を短縮することが期待されている。

そこで本研究では、ポリシアネート樹脂及びその複合材料を対象とし、超音速輸送機使用想定温度での長期高温暴露が耐熱複合材料の各種特性に及ぼす影響を把握することを目的とした。このため、各種試験片に対して高温暴露試験及びその後の包括的な機械的試験を行った。また評価期間短縮のための加速試験方法を提案し、加速試験の有効性について評価を行った。

本論文は下記の7つの章で構成される。

第一章では、超音速輸送機の主構造あるいは従来機の高温部品への適用が期待される耐熱複合材に焦点をあてた。CFRPの特性に及ぼす熱酸化劣化の影響を明らかにすること及び恒温暴露並びに加速劣化試験について述べた。

第二章では、ポリシアネート樹脂単体の重量、化学的構造及び破壊じん性に及ぼす高温暴露の影響について評価した。180℃、大気圧条件下で8,000時間までの恒温暴露試験を行い実験的な評価を行った。フーリエ変換型赤外分光装置（FTIR）を用い、全反射法により化学的構造変化について分析した。熱酸化劣化による破壊じん性値の低下についてSENB(Single-Edge-Notch Bending)試験により評価した。

第三章では、ポリシアネートCFRPの重量に及ぼす熱酸化劣化の影響について評価した。180℃、大気圧条件下で8,000時間までの恒温暴露試験を行い実験的な評価を行った。重量変化について従来実施されていた一方向材料のみならず、多方向積層材料について実験的に評価を行い、一方向材料の結果から多方向積層材料の重量変化を定量的に予測する手法を提案した。

第四章では、複合材料のメゾスコピック及びマイクロスコピックスケールでの損傷発生及び進展に及ぼす熱酸化劣化の影響について、軟X線撮影及び共焦点型レーザー顕微鏡を用いて評価した。CFRPの異方性的損傷挙動を支配する複合材料中のマイクロスケールにおける層内及び層間の樹脂の収縮挙動について、樹脂の収縮程度を定量的に予測する手法を提案した。

第五章では、複合材料の破壊機構及び機械特性に及ぼす熱酸化劣化の影響について評価した。包括的な材料試験を通して、負荷中に発生する破壊機構の変化、及び、これに

伴う機械的特性の変化に及ぼす暴露の影響をアコースティックエミッション（AE）法を用いて評価した。

第六章では、負荷圧力上昇による加速試験方法を提案した。熱酸化劣化を加速することを目的に、樹脂単体及び複合材料に対して、負荷圧力の上昇が熱酸化劣化に及ぼす影響について評価した。加速試験は 180℃で 2 圧力条件（0.3 MPa 及び 0.5 MPa）において最大 2,000 時間まで実施し、重量、損傷挙動及び機械特性の変化について調査した。

第七章では、本論文で示した内容についてまとめ、今後の研究課題を示した。