

# 論文の内容の要旨

論文題目「Development of a New Strengthening Method in Short Glass  
Fiber Reinforced Polymer Composites」  
(短ガラス繊維強化高分子複合体の強靱化に関する研究)

学位申請者 Michael Christopher Faudree

キーワード：複合材、ガラス繊維、高分子、炭酸カルシウム粉末、強靱化

本研究では、ガラス短繊維、熱硬化性ポリエステル/スチレン-ブタジエン、および炭酸カルシウム充填材の3相から構成される、ガラス繊維強化高分子 (GFRP) の複合材料 (GFRP-BMC) の強靱化について検討し、短尺繊維分散強化機構を明らかにした。第一の成果は集合組織短繊維配向角度の増加にともないGFRP-BMCの衝撃値の改良である。結果は第三章に記述した。第二の成果は、均一な低エネルギー電子線照射 (HLEBI) 処理が、GFRP-BMCの衝撃値をさらに向上させることを見出し、第四章に記述した。第三の成果は、添加する繊維の長さを、サブミリメートルまでの短尺化することにより、GFRP-BMCの衝撃値、引張変形抵抗率(弾性係数)、破壊強度(引張強度)と、破壊歪が向上することであり、第五、六、七章で記述した。これは、破壊靱性値から計算出来る臨界クラック長より短い0.44mm長さの極短尺繊維の分散と、各繊維端で発生する圧縮応力の増加により説明でき、高分子複合材料において初めて公表された、本研究の最大の成果である。この結果の基づく短尺繊維分散強化機構を提案した。第4の成果は、射出成型した混合流体の数値シミュレーションである。GFRP-BMCの極短尺繊維配向集合組織のSEM断面画像は、3層(表皮-心-表皮)構造を示し、この計算と実験結果に良い相関関係を見出した。この結果から、機械的性質の再現性を高めるための製造条件に関する基礎的知見を得、第八章に記述した。

第一章は序論で、研究背景と、寸法精度、難燃性、高絶縁性、耐食性、色彩安定性に合わせて成分配合を最適化したGFRP-BMCに関する概観を紹介し、本研究の目的を述べた。

第二章は、GFRP-BMC試料の作製と評価方法について述べた。試料の作製は、精密な寸法と円滑な表面仕上げで大量生産に用いられている射出圧縮成形を用いた。

第三章は、集合組織の影響について述べた。試料切り出し前のマザーパネル中央部は、配向角度がランダム分布の凝固組織であり、外縁部よりマザーパネル中央のシャルピー衝撃値( $a_{uc}$ )は著しく低い。そこで、短繊維の配向角度が異なる4種類の集合組織に分類したところ、GFRP-BMC試料の配向角度が高いと衝撃値を高めることを見出した。さらに、これを三母数ワイブル関数で計算し、下限衝撃値( $a_s$ )を求めた。短繊維配向角度が $17.5^\circ$ の試料に比較し、配向角度 $68^\circ$ の試料は、101%向上した。その結果、短繊維の配向角度が高い集合組織試料は、衝撃破壊抵抗が高いことを見出した。

第四章は電子線照射(HLEBI)によるGFRP-BMC試料の衝撃値の向上について述べた。マザーパネル中央部は、外縁部より衝撃値が著しく低いが、中央部へのHLEBI処理により、5から25%程、 $a_{uc}$ を高めることを見出した。さらに、0.3MGy照射した $45^\circ$ 配向集合組織試料の $a_s$ は、未照射試料よりも約64%向上することを明らかにした。ESRの結果からHLEBIが高分子中の共有結合を切断することで、高分子内にダングリングボンドを伴う終端原子を生成させ、圧縮サイトを形成することが主な強化機構である。さらに、高い衝撃値の試料では、単純な破壊から、2次マイクロクラックの増殖や、主クラック付近の複雑な破壊機構への変換も、衝撃値向上に有効である。

第五章は、繊維の短尺化もGFRP-BMCの衝撃値向上に寄与することを述べた。

第六章においてGFRP-BMCの弾性率の機構を説明した。この複合材料の弾性率は、ポリエステル単独で2 GPa、CaCO<sub>3</sub>微粉末添加複合化で4.5GPaまで向上し、市場で流通している6.4 mm長さの繊維による強化で6.5GPaまで増加する。さらに、繊維長さを0.44 mmまで短尺化すると8 GPaまで付加的に向上することを見出した。応力-歪曲線から弾性率の指標となる変形抵抗率を求めたところ、この繊維長さの短尺化は、GFRP-BMCの初期変形抵抗率を27%、最大変形抵抗率を22%向上させた。これは、母材のポリエステル樹脂の熱膨張係数(CTE)が、Eガラスのそれより約1桁大きい為、成型凝固冷却時に繊維間隙の母材中に圧縮残留応力が生じ、母材分子密度が増大することによる。さらに、繊維短尺化による繊維/母材界面の面積増加が積算され、変形抵抗率向上が説明できる。

第七章は、繊維長さの短尺化により、GFRP-BMCの引張破壊強度( $\sigma_f$ )と、引張破壊歪( $\epsilon_f$ )の増加に関する成果である。0.44 mm長の極短尺繊維を用いたGFRP-BMCの $\sigma_f$ と $\epsilon_f$ は、6.4mm長の繊維試料と比べても、約60と40%程度向上した。この短尺化は繊維端密度を高め、変形の際に繊維端における繊維/母材界面近傍におけるcrazing密度が増加する。crazing領域はクラック伝播を抑制する圧縮場を保持する微小塑性変形と、臨界クラック長さ( $0.50 < 2a_c < 5.0$  mm)以下の微小クラックを内在する。ここで、マイクロクラックが主クラック先端近傍で応力集中を抑制する理由をSEM観察や超音波吸収の測定結果を用いて考察した。マイクロクラックが破壊エネルギーを吸収することにより、マイクロクラックファンク機構を発現する。臨界クラック長さ、繊維端の圧縮応力領域、マイクロクラックファンク、繊維の引抜き緩和効果の全てがクラック伝播を抑制し、GFRP-BMCの破壊歪の増加に寄与する可能性が高い。さらに、前章の変形抵抗率の増大も考慮すると、引張破壊強度向上や第五章の衝撃値向上も説明できる。

第八章は、極短尺繊維、熱硬化性ポリエステル/スチレンブタジエン、炭酸カルシウム充填材の混合流体の射出成型時における数値シミュレーションについて述べた。繊維集合組織のSEM断面画像は、表皮-心-表皮の三層構造を示す。この結果と数値シミュレーション結果は相関した。

第九章は総括である。