

# 「炭素繊維・炭素繊維複合材料の未来」 目次

## 第1章 炭素繊維・炭素繊維複合材料技術の現状

- 1.1 炭素繊維の製造方法
  - 1.1.1 PAN系炭素繊維
    1. 炭素繊維の発明
    2. PAN系炭素繊維の誕生
    3. PAN系炭素繊維の製造方法
    4. PAN系炭素繊維の物性
    5. PAN系炭素繊維の構造変化と物性の発現
  - 1.1.2 ピッチ系炭素繊維
    1. 歴史
    2. 製造方法
    3. ピッチ系炭素繊維の構造、組織および物性
    4. 用途
      - 4.1 長繊維異方性ピッチ系炭素繊維の用途
        - 4.1.1 高引張弾性率を利用した用途
        - 4.1.2 高熱伝導性を利用した用途
        - 4.1.3 低熱膨張を利用した用途
      - 4.2 短繊維等方性ピッチ系炭素繊維の特徴と用途
        - 4.2.1 ミルド繊維
        - 4.2.2 チョップド繊維
        - 4.2.3 カーボンペーパー、カーボンシート
        - 4.2.4 吸音軽量断熱材
        - 4.2.5 カーボンフェルト断熱材、成形断熱材
      5. おわりに
  - 1.2 国内の研究開発動向
    1. 自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発
    2. 炭素繊維製造エネルギー低減技術の研究開発
    3. サステナブルハイパーコンポジット技術の開発
    4. 革新炭素繊維基盤技術開発
    5. 革新炭素繊維製造プロセス開発
    6. 革新的新構造材料等技術開発
    7. プロジェクトの背景
  - 1.3 海外の研究開発動向
    - 1.3.1 炭素繊維
      1. 米国 UT-Battelle, LLC(Oak Ridge National Laboratory)
      - 1.1 プリカーサー
      - 1.2 耐炭化工程
      - 1.3 炭素化工程
      - 1.4 日米プロジェクトの比較
      2. ヨーロッパ
      3. 台湾
      4. オーストラリア
      5. その他
    - 1.3.2 炭素繊維複合材料
      1. オートメーション(自動化)
      2. マルチマテリアル/ハイブリッドデザイン
      3. プレイスメント技術
      4. 産学連携
      5. 複合材料の開発体制

## 第2章 炭素繊維の評価技術

- 2.1 炭素繊維の異方性力学特性の評価・解析

- 2.1.1 単繊維引張試験
  1. ワイブル分布に基づく単繊維強度分布の解析
  2. 樹脂中での単繊維引張試験
  3. 液体中での単繊維引張試験
  4. 表面ノッチを導入した繊維の単繊維引張試験
- 2.1.2 単繊維の三点曲げ試験
  1. はじめに
  2. 実験方法
  3. 結果と考察
  4. まとめ
- 2.1.3 単繊維のねじり試験
  1. はじめに
  2. 試験条件の影響
    - 2.1 慣性モーメント
    - 2.2 初期歪の影響
    - 2.3 測定周期
    - 2.4 ガラス管の影響
    - 2.5 空気抵抗および内部摩擦
    - 2.6 繊維径の影響
    - 2.7 ねじり試験の条件の影響のまとめ
  3. ねじり引張試験
- 2.1.4 単繊維の軸方向圧縮試験
  1. 緒言
  2. 単繊維の軸方向圧縮試験法
  3. 圧縮弾性率を測定する方法
  4. マイクロコンプレッション法を用いた圧縮試験例
    - 4.1 圧縮強度の評価
    - 4.2 圧縮弾性率の評価
  5. まとめ
- 2.1.5 単繊維の横方向圧縮試験
  1. はじめに
  2. 試験および解析方法
  3. 結果と考察
  4. まとめ
- 2.1.6 単繊維の到達可能強度の評価
  1. 緒言
  2. 強度ポテンシャルを表す指標について
  3. 到達可能強度の推定方法～ノッチ導入引張試験～
  4. 到達可能強度の評価例
    - 4.1 炭素繊維の異方性を考慮した応力集中係数の計算
    - 4.2 炭素繊維の力学的異方性評価
    - 4.3 ノッチ導入引張試験
    - 4.4 Point Stress Criterionを用いた到達可能強度
  5. まとめ
- 2.1.7 単繊維の疲労試験
  1. はじめに
  2. 炭素繊維の疲労
  3. 単繊維試料で疲労試験を行う目的
  4. 単繊維疲労試験の方法
  5. 単繊維疲労試験から得られるデータの解析について

- 6. おわりに
- 2.1.8 炭素繊維の線熱膨張係数の測定
  - 1. はじめに
  - 2. 熱膨張特性評価システムの構成
  - 3. 測定試料および測定条件
  - 4. 測定結果
    - 4.1 繊維軸方向の測定結果
    - 4.2 径方向の測定結果
  - 5. まとめ
- 2.2 炭素繊維の構造と力学特性の関係
  - 1. 炭素繊維の構造
  - 2. 炭素繊維の引張弾性率
  - 3. 炭素繊維の横方向圧縮弾性率・横方向圧縮強度
  - 4. 炭素繊維の繊維軸方向圧縮強度
- 2.3 母材の影響を含めた炭素繊維の評価
  - 1. はじめに
  - 2. 炭素繊維の直接圧縮挙動とシングルファイバーモデルコンポジットにおける炭素繊維の圧縮挙動
  - 3. 材料および試験片
  - 4. 試験方法
  - 5. 炭素繊維の電気抵抗測定による圧縮破壊の検出方法
  - 6. ワイブル分布による破断ひずみのばらつきの評価
  - 7. シングルファイバーモデルコンポジットの圧縮荷重における炭素繊維の電気抵抗変化
  - 8. 圧縮破壊の観察
  - 9. 圧縮破断ひずみ
  - 10. 直接圧縮試験により得られる炭素繊維の圧縮挙動との比較
  - 11. おわりに

### 第3章 炭素繊維複合材料の評価技術

- 3.1 炭素繊維複合材料の力学的特性の実験的評価法
  - 3.1.1 汎用樹脂系 (PP/CF, PA/CF)
    - 1. はじめに
    - 2. 繊維方向圧縮強度の理論検討
    - 3. 実験方法
      - 3.1 繊維初期不整合配向やキンクバンドの内部撮像
      - 3.2 従来の圧縮試験法の問題点
      - 3.3 新しい圧縮試験法の提案と温度制御下での圧縮試験
    - 4. 結果と考察
      - 4.1 初期不整合配向角の観察
      - 4.2 温度依存パラメータの抽出と圧縮強度予測
      - 4.3 圧縮強度とキンクバンド角
      - 4.4 温度と圧縮強度
      - 4.5 繊維初期不整合配向とひずみ硬化指数の影響
    - 5. 結言
  - 3.1.2 熱可塑性ポリイミド系 (PI/CF)
    - 1. 熱可塑性ポリイミド「オーラムR」の概要
    - 2. 熱可塑性ポリイミド事業開発の背景
    - 3. 熱可塑性ポリイミドの分子設計
    - 4. 熱可塑性ポリイミド「オーラムR」の特長
    - 5. 製品の用途展開例及び主要銘柄の物性
      - 5.1 自動車用途での応用事例(シール部品)
      - 5.2 電気電子・事務機器用途での応用事例
    - 6. 熱可塑性複合材料(CFRTP)での検討事例

- 6.1 中間成形体(プリプレグ)向けの原料形態
- 6.2 パウダー含浸法での検討事例
- 6.3 樹脂フィルム含浸法
- 7. 今後の展開
- 3.1.3 液晶ポリマー系 (LCP/CF)
  - 1. 緒言
  - 2. 液晶性高分子
  - 3. 炭素繊維複合材料の3点曲げ特性
  - 4. 実験
    - 4.1 LCP/CF-UD 材の3点曲げ試験
    - 4.2 LCP/CF-QI 材の3点曲げ試験
    - 4.3 LCP/CF 系の単糸引抜試験による界面せん断強度評価
  - 5. 結果と考察
  - 6. 結言
- 3.1.4 高機能樹脂系(熱硬化型導電性樹脂/CF)
- 3.1.5 特殊樹脂系(熱可塑エポキシ樹脂/CF, PA/CF)
  - 1. はじめに
  - 2. 熱可塑エポキシ樹脂
  - 3. 現場重合ナイロン6
  - 4. まとめ
- 3.2 炭素繊維複合材料の界面評価法
  - 3.2.1 マイクロ・ドロップレット法
    - 1. はじめに
    - 2. “単繊維/樹脂”の界面のせん断強度評価法
    - 3. マイクロ・ドロップレットの試験法と実験装置
    - 4. マイクロ・ドロップレット法による実験評価の事例
    - 5. おわりに
  - 3.2.2 ピンホール式単糸引抜き法
    - 1. ピンホール式単糸引抜き法とは
    - 2. ピンホール法試験機の概要
    - 3. 試験片作成手順、試験手順
      - 3.1 試験手順
      - 3.2 炭素繊維/ポリプロピレン(CF/PP)の引抜き試験結果
      - 3.3 CF/PP 荷重変位線図による引抜き成分の分離
      - 3.4 樹脂・繊維界面の剥離進展機構の解明
      - 3.5 樹脂結晶の観察
      - 3.6 界面せん断強度の温度依存性
      - 3.7 ナイロン6 (PA6)の吸湿試験
      - 3.8 マイクロコンポジット(CF/PP)による引抜き試験
        - 3.8.1 マイクロコンポジット引抜き試験片
        - 3.8.2 試験結果
      - 3.9 終わりに
  - 3.2.3 フルスケール引張試験片を用いたフラグメンテーション試験と解析法
    - 1. 緒言
    - 2. 破断繊維長分布関数  $F(l)$  と評価式<sup>?)</sup>の導出
    - 3. 実験
      - 3.1 目的
      - 3.2 供試体
      - 3.3 試験片の作製
      - 3.4 フラグメンテーション試験
      - 3.5 単繊維引張試験
    - 4. 結果

- 4.1 単繊維引張試験
- 4.2 フラグメンテーション試験
- 5. 解析
- 6. 考察
- 6.1 破断繊維長のヒストグラムと臨界繊維長
- 6.2 界面せん断強度
- 6.3 ワイブルプロット
- 7. 結言
- 8. 補遺

#### 第4章 リサイクル技術

- 4.1 リサイクル技術の動向
  - 1. はじめに
  - 2. 廃棄CFRPのリサイクル手法
  - 3. CFRPのリサイクル技術開発の動向
- 4.2 種々のCFRPに対するリサイクル手法の探索
  - 1. はじめに
  - 2. エポキシ樹脂を母材とするCFRPのリサイクル手法
  - 3. 汎用性熱可塑樹脂(ポリアミド6)を母材とするCFRTPのリサイクル手法
  - 4. 耐熱性熱可塑樹脂(ポリエーテルサルフォン)を母材とするCFRTPのリサイクル手法
- 4.3 過熱水蒸気を利用したリサイクル炭素繊維回収と繊維表面改質
  - 1. はじめに
  - 2. 過熱水蒸気とは
  - 3. 過熱水蒸気を利用したCFRPからの炭素繊維回収検討
  - 4. 炭素繊維の強度変動におよぼす過熱水蒸気処理時のPO2の影響
  - 5. 過熱水蒸気処理による炭素繊維の表面改質
  - 6. 省エネ型高品位リサイクル炭素繊維連続回収装置の開発
  - 7. おわりに
- 4.4 リサイクル炭素繊維のCFRPへの展開
  - 1. はじめに
  - 2. 不連続炭素繊維を用いた高強度・高弾性率CFRPの製造技術
    - 2.1 絞込み押し出しによる不連続炭素繊維配向体の製造技術
    - 2.2 不連続炭素繊維配向CFRPの機械特性
    - 3. 不連続炭素繊維CFRP製造プロセスへのマイクロ波利用
      - 3.1 マイクロ波による不連続炭素繊維CFRP加熱に伴う消費エネルギー、機械特性
      - 3.2 不連続炭素繊維の長さがCFRPのマイクロ波加熱に与える影響
    - 4. おわりに

#### 第5章 成形技術

- 5.1 成形技術開発動向
  - 5.1.1 技術コンソーシアム
    - 1. AZLの概要
    - 2. AZLの特徴
    - 3. AZLにみる技術コンソーシアムが機能する要因
      - 3.1 費用分担という考え方
      - 3.2 川上から川下までの連携とマーケット検証を含めた

- ビジネスの考慮
  - 3.3 NDAを締結した後の各社、各研究機関のオープンな議論
  - 3.4 短中期スパンでのプロジェクト管理
  - 4. 日本における技術コンソーシアムであるICC
  - 5. ICCの取り組みの特徴
  - 6. 日本における技術コンソーシアムの課題と解決に向けたICCでの取り組み
  - 7. おわりに

- 5.1.2 オートメーション化
  - 1. 炭素繊維複合材料を用いた製品の生産工程
  - 2. 裁断のオートメーション化と課題
  - 3. 積層のオートメーション化と課題
  - 4. 成形のオートメーション化と課題
  - 5. 加工のオートメーション化と課題
  - 6. 検査のオートメーション化と課題
  - 7. おわりに
- 5.1.3 カスタマイズドプリプレグ
  - 1. 熱可塑性プリプレグの特徴
  - 2. 熱可塑性プリプレグの製造
  - 3. 顧客要望に応じた材料作製概要
  - 4. カスタマイズドプリプレグ設計に関する議論のポイント
  - 5. 熱可塑性プリプレグ材料から一歩前に行くアプローチ
  - 6. おわりに
- 5.1.4 ヒート&クールプレス成形(GMS仕様)
  - 1. はじめに
  - 2. GMS(Go Molding System)概要
    - 2.1 フルH&C成形
    - 2.2 セミH&C成形
    - 2.3 コールドプレス(スタンピング成形)
  - 3. 技術の実績
    - 3.1 軽量化
    - 3.2 量産化
    - 3.3 設計
  - 4. 技術の課題
  - 5. おわりに
- 5.1.5 ポリマー微粒子による炭素繊維の表面修飾-熱可塑性樹脂含浸性・界面接着性の向上-
  - 1. 炭素繊維強化熱可塑性樹脂(CFRTP)
  - 2. ポリマー微粒子による炭素繊維束の表面修飾技術の開発
  - 3. 電着操作による炭素繊維表面へのポリマー微粒子吸着量の制御
  - 4. 表面修飾による炭素繊維と熱可塑性樹脂の界面接着性の向上
  - 5. CFRTPの作製とその曲げ物性の評価
  - 6. 本技術の今後の展望

- 5.2 次世代成形技術:連続炭素繊維3Dプリント
  - 1. はじめに
  - 2. 連続炭素繊維3Dプリンター
    - 2.1 3Dプリンタ装置概要
    - 2.2 3Dプリントの流れ
    - 2.3 連続炭素繊維含浸フィラメント作製

- 2.4 炭素繊維切断機構の導入
- 2.5 ヒーターブロックとノズル及びフィラメント送り機構の改造
- 3. 連続炭素繊維3DプリンターによるCFRTP成形物の評価
- 3.1 引張試験機及び試験条件
- 3.2 試験片作製
- 3.3 引張試験結果
- 4. おわりに

## 第6章 アプリケーション技術

- 6.1 用途展望
  - 1. はじめに
  - 2. PAN系炭素繊維を用いた複合材料
  - 3. ピッチ系炭素繊維を用いた複合材料
  - 4. C/C, MMC
  - 5. スマートマテリアル&ストラクチャとしての複合材料
  - 5.1 複合材料への適用
    - 5.1.1 ヘルスモニタリング・ヘルスマネジメント
    - 5.1.2 高性能材料・構造システム
    - 5.1.3 海洋ドローン
  - 5.2 複合材料成形プロセスへの応用
  - 6. おわりに
- 6.2 航空機
  - 6.2.1 耐雷撃技術
    - 1. はじめに
    - 2. 航空機の雷環境
      - 2.1 航空機の被雷頻度
      - 2.2 日本における冬季雷の発生状況
      - 2.3 被雷による航空機への影響
      - 2.4 航空機開発における雷試験規格
      - 2.5 雷電流試験
    - 3. CFRPの雷損傷
      - 3.1 CFRPの電気的特性
      - 3.2 CFRP雷損傷のメカニズム
      - 3.3 CFRPの雷損傷メカニズムに対する様々な物理現象の影響
        - 3.4 種々の物理現象の影響評価
          - 3.4.1 光ファイバセンサによる温度・ひずみの計測
          - 3.4.2 衝撃波の可視化
        - 3.5 導電率の影響
        - 3.6 樹脂の力学的、熱的特性の影響
- 6.2.2 ロシアにおける複合材とVaRTM法による旅客機主翼製造
  - 1. ロシアの炭素繊維複合材産業
  - 2. ロシアの旅客機・輸送機の開発と複合材
  - 3. MC-21
  - 4. MC-21の開発生産体制
    - 4.1 胴体
    - 4.2 主翼
    - 4.3 尾翼
    - 4.4 最終組立
  - 5. MC-21の主翼製造
    - 5.1 MC-21の複合材製主翼の意義
    - 5.2 アエロコンポジット社

- 5.3 アエロコンポジット・ウリヤノフスク社と生産内容
- 5.4 MC-21の主翼生産
  - 5.4.1 概略
  - 5.4.2 材料
  - 5.4.3 積層
  - 5.4.4 バギング
  - 5.5.5 樹脂注入・硬化
  - 5.5.6 脱型、トリミング、検査
  - 5.5.7 組立
- 6. まとめ
- 6.3 自動車(マルチマテリアル)
  - 1. 自動車を取り巻く環境の変化と自動車(2030年)
  - 2. 自動車構成材料の動向
  - 3. 自動車構成材料の今後(~2030年)
  - 4. 自動車構成材料の今後(2030年)
    - 4.1 本格的なLCAの追求
    - 4.2 将来自動車構成材料への取り組み
      - 4.2.1 低コスト良LCA材料の開発
      - 4.2.2 マルチマテリアルの必要性
      - 4.2.3 マルチマテリアルの課題
  - 5. まとめ
- 6.4 熱可塑性複合材料のエコカー(HEV, PHEV, BEV)用途への展開可能性
  - 1. 緒言
  - 2. 炭素繊維複合材料の量産化技術
    - 2.1 熱可塑性樹脂炭素繊維複合材料の成形加工と用途
    - 2.2 CFRP UDテープの基本物性
    - 2.3 CF/PP UDテープを用いた部材設計
    - 2.4 成形加工CAE・部品デザイン
  - 3. 自動車構造部材への可能性
    - 3.1 板材(積層材及びサンドウィッチ材)の設計
    - 3.2 金属/樹脂接合部材の設計
  - 4. リチウムイオン電池筐体部材への可能性
    - 4.1 エコカー向けリチウムイオン電池
    - 4.2 リチウムイオン電池筐体の設計
    - 4.3 リチウムイオン電池筐体へのCFRP可能性
  - 5. 終わりに
- 6.5 建築・土木
  - 1. はじめに
  - 2. FRPの適用動向
    - 2.1 建築分野への利用例
    - 2.2 土木分野への利用例
  - 3. 成形法及び材料開発
    - 3.1 建築・土木分野のFRP成形技術
    - 3.2 建築・土木分野のFRP材料技術
  - 4. 日本が建築・土木分野へ取り組むために
    - 4.1 熱可塑性FRPと連続成形技術による汎用構造部材
  - 5. まとめ
- 6.6 光ファイバを用いたCFRPヘルスマニタリングとその応用