

# 「改訂増補版 プラスチック製品の強度設計とトラブル対策」目次

## 序文

### 第1章 プラスチックの強度と破壊に関する概論

- 1. 1 プラスチックの強度
  - 1) プラスチックの強度特性
  - 2) プラスチックの強度発現機構
- 1. 2 プラスチックの破壊
  - 1) 破壊機構
  - 2) 延性破壊と脆性破壊
  - 3) 破壊とばらつき
  - 4) 破壊の進行プロセス
- 1. 3 プラスチックの強度に影響する諸要因

コラム 現場からのひとこと 1 材料強度学との出会い

### 第2章 プラスチックの強度と材料設計

- 2. 1 強度の概念
  - 1) 静的強度
  - 2) 長時間強度
  - 3) 耐熱強度
  - 4) 衝撃強度
  - 5) 化学的雰囲気下における強度
  - 6) 劣化
- 2. 2 基本特性
  - 1) 分子構造と強度
  - 2) 平均分子量、分子量分布
  - 3) 分岐、架橋
  - 4) 立体規則性
  - 5) 分子末端
- 2. 3 高次構造と強度
  - 1) 分子配向
  - 2) 結晶構造
- 2. 4 添加剤配合と強度
- 2. 5 繊維強化材料
  - 1) 複合則と実際の強度
  - 2) 繊維強化による実用強度
  - 3) 繊維配向と強度
  - 4) アスペクト比と強度
- 2. 6 ポリマーアロイ材料
  - 1) 相構造と衝撃強度
  - 2) モルフォロジーとウェルド強度
  - 3) モルフォロジーと耐熱強度
  - 4) モルフォロジーとソルベントクラック性
- 2. 7 ナノコンポジット材料

コラム 現場からのひとこと 2 材料データと製品設計データのミスマッチ

### 第3章 プラスチックの力学的性質

- 3. 1 基礎的性質
  - 1) 粘弾性
  - 2) 結晶性プラスチックと非晶性プラスチック
  - 3) 結晶の融点と結晶化温度
  - 4) ガラス転移温度
  - 5) 動的粘弾性と転移温度
- 3. 2 各試験法と特性

- 3. 2. 1 引張特性
  - 1) 試験法
  - 2) 引張特性
- 3. 2. 2 曲げ特性
  - 1) 試験法
  - 2) 曲げ特性
- 3. 2. 3 衝撃特性
  - 1) 各試験法
  - 2) 衝撃強度特性
- 3. 2. 4 応力緩和、クリープ
  - 1) 試験方法
  - 2) 応力緩和特性
  - 3) クリープ特性
- 3. 2. 5 疲労強度
  - 1) 試験方法
  - 2) 疲労特性

コラム 現場からのひとこと 3 曲げ強度と引張強度の違い

### 第4章 プラスチックのストレスクラック性

- 4. 1 クレーズとクラック
  - 1) クレーズ
  - 2) クラック
  - 3) 温水によるクラック
- 4. 2 ストレスクラック
  - 1) ストレスクラック性の試験方法
  - 2) ストレスクラック特性
- 4. 3 ソルベントクラック
  - 4. 3. 1 ソルベントクラックの試験方法
    - 1) ベントストリップ法
    - 2) 4分の1楕円法
    - 3) ひずみ負荷及び応力負荷法
    - 4) C型試験片による方法
  - 4. 3. 2 ソルベントクラック特性

コラム 現場からのひとこと 4 分子量とは

### 第5章 プラスチックの劣化と寿命

- 5. 1 熱劣化
  - 1) 熱劣化の原理と抑制
  - 2) 反応速度論と熱劣化
  - 3) ポリマーと熱分解パターン
  - 4) 熱分解挙動
  - 5) 使用条件による熱劣化
- 5. 2 加水分解による劣化
  - 1) 成形時の加水分解
  - 2) 使用時の加水分解
- 5. 3 紫外線による劣化
  - 1) 劣化の原理と抑制
  - 2) 耐紫外線性の試験方法
  - 3) 耐候性特性
- 5. 4 その他の劣化
  - 1) 放射線照射による劣化
  - 2) オゾン劣化
  - 3) 微生物による分解

- 5. 5 プラスチック製品の寿命評価法
  - 5. 5. 1 寿命の終点の考え方
  - 5. 5. 2 寿命予測法
    - 1) 熱劣化、加水分解の予測
    - 2) 使用中の温度が変化する場合のトータル寿命の予測
    - 3) 促進暴露試験結果から屋外暴露寿命の予測
    - 4) クリープ破壊寿命の予測
    - 5) 加速劣化試験による寿命推定
    - 6) 市場回収品、実装試験品などによる寿命評価法

コラム 現場からのひとこと 5 紫外線、X線、ガンマ( $\gamma$ )線などを照射すると、なぜ劣化するのか？

## 第6章 プラスチックの製品設計

- 6. 1 強度設計
  - 1) 強度設計に必要な材料データベース
  - 2) 材料力学による計算
- 6. 2 形状設計
  - 1) 肉厚
  - 2) コーナアール
  - 3) リブ
  - 4) ボス
  - 5) ウェルドライン
- 6. 3 要素設計
  - 6. 3. 1 成形インサート
    - 1) 金具周囲に発生する残留応力
    - 2) インサートクラックと対策
  - 6. 3. 2 プレスフィット (圧入)
    - 1) しめしろ $\Delta D$ の設計
    - 2) プレスフィットの注意点
  - 6. 3. 3 熱圧入法
  - 6. 3. 4 ねじ接合
    - 1) ねじ締め付けトルクと締め付け荷重
    - 2) ねじ接合の設計
  - 6. 3. 5 接着
  - 6. 3. 6 塗装

コラム 現場からのひとこと 6 インサート成形の「べからず集」

## 第7章 射出成形工程における諸要因と成形品強度

- 7. 1 残留ひずみ
  - 7. 1. 1 残留ひずみとは
  - 7. 1. 2 残留ひずみの発生過程と品質の関係
  - 7. 1. 3 分子配向ひずみと対策
    - 1) 分子配向ひずみの発生原理
    - 2) 分子配向ひずみと射出成形対策
  - 7. 1. 4 残留ひずみと対策
    - 1) 残留ひずみの発生原理
    - 2) 残留ひずみと射出成形対策
  - 7. 1. 5 残留ひずみの測定方法と測定例
    - 1) 分子配向ひずみの測定法
    - 2) 残留ひずみ測定法
- 7. 2 アニール処理による残留ひずみの除去
  - 1) アニール処理とは
  - 2) アニール方法と条件
  - 3) アニール処理の注意点
  - 4) アニール処理を必要とするケース
- 7. 3 成形時の分解

- 1) 熱分解
  - 2) 熱分解の確認
- 7. 4 加水分解
  - 1) 加水分解と強度
  - 2) 成形条件と加水分解
  - 3) 加水分解の確認
- 7. 5 成形品に生じる欠陥部
  - 1) 欠陥部と強度
  - 2) 成形品に発生する欠陥部
- 7. 6 再生材の使用
  - 1) 再生による物性低下の考え方
  - 2) 再生時の劣化要因と対策

コラム 現場からのひとこと 7 残留ひずみという用語

## 第8章 割れトラブルと原因究明

- 8. 1 割れトラブルのケーススタディ
  - 8. 1. 1 プラスチック製品の割れトラブル例
    - 1) 材料及び使用条件の原因による割れトラブル
      - a) ソルベントクラックによる割れトラブル
      - b) 応力集中による割れトラブル
      - c) 化学薬品による割れトラブル
      - d) 熱劣化による割れトラブル
      - e) 疲労による割れトラブル
      - f) クリープ、応力緩和による割れトラブル
      - g) 紫外線劣化による割れトラブル
    - 2) 人為的要因による割れトラブル
      - a) 材料選定ミスによる割れトラブル
      - b) 設計ミスによる割れトラブル
      - c) 成形ミスによる割れトラブル
      - d) 乱暴な使用による割れトラブル
  - 8. 1. 2 プラスチック製品の割れトラブルの特徴
    - 1) トラブル例1 微細なクラックは見逃され、製品に組み込まれた後に割れトラブルになる。
    - 2) トラブル例2 いくつかの要因が重なって割れトラブルになる。
    - 3) トラブル例3 延性破壊から脆性転移に移行する温度やひずみ速度では強度はばらつく。
    - 4) トラブル例4 時間が経ってからクラックが発生する。
    - 5) トラブル例5 割れトラブル発生率は低い場合、原因を特定できないことが多い。
- 8. 2 割れトラブルの原因究明
  - 8. 2. 1 割れ品の調査
  - 8. 2. 2 現場の使用状況調査
  - 8. 2. 3 トラブル品のトレーサビリティ
  - 8. 2. 4 仮説を立てる
    - 1) 仮説1 成形工程でプラスチックが分解劣化した。
    - 2) 仮説2 成形工程で高次構造が変化した。
    - 3) 仮説3 成形品に欠陥があり、応力集中によって割れた。
    - 4) 仮説4 残留応力が過大であるため割れた。
    - 5) 仮説5 使用時の負荷応力が過大で割れた。
    - 6) 仮説6 使用段階の物理的要因で割れた。
    - 7) 仮説7 使用段階で材料が劣化して割れた。
  - 8. 2. 5 割れサンプルの分析調査
  - 8. 2. 6 加速再現試験
  - 8. 2. 7 対策
  - 8. 2. 8 対策の効果確認

## 第9章 破損解析法

- 9.1 不良品の材料分析法
  - 1) 分子量測定法
    - a) 粘度法
    - b) GPC法
  - 2) メルト・マス・フロー・レイト (MFR) 測定法
  - 3) 熱分解性の測定法
- 9.2 密度、結晶化度の測定法
  - 1) 密度の測定法
  - 2) 結晶化度測定法、結晶状態観察法
- 9.3 分子配向の測定法
- 9.4 異物の分析法
- 9.5 成形品の欠陥部観察法
- 9.6 成形品の強度測定法
  - 1) 試験片切り出し法
  - 2) 衝撃試験法
  - 3) 微小切削法
- 9.7 加速再現試験法
- 9.8 破面解析法
  - 1) プラスチックの破面解析の特徴
  - 2) 破面解析の手順
  - 3) 材料と破面の特徴
  - 4) 材料や破壊条件と破面
  - 5) 負荷応力及び欠陥部と破面
  - 6) 欠陥部の破面
- 9.9 繊維強化材料の破損解析
  - 1) 含有率の測定法
  - 2) 繊維長さ、アスペクト比
  - 3) 繊維配向の測定法
  - 4) 繊維とマトリックス (プラスチック) の接着状態観察
- 9.10 ポリマーアロイ材料に関する破損解析

## 第10章 高性能・高機能プラスチック

- 10.1 汎用プラスチックの高性能化
  - 1) ポリメチルペンテン (PMP)
  - 2) シンジオタクテックポリスチレン (SPS)
  - 3) 耐熱 ABS 樹脂
  - 4) 超高分子量ポリエチレン (PE-UHMW)
- 10.2 汎用エンジニアリングプラスチックと高性能化
  - 1) ポリアミド (PA)
  - 2) 飽和ポリエステル
- 10.3 スーパーエンジニアリングプラスチックと高性能化
- 10.4 光学用プラスチック
  - 1) メタクリル樹脂系光学プラスチック
  - 2) ポリカーボネート系光学プラスチック
  - 3) 環状ポリオレフィン系光学プラスチック
  - 4) ポリエステル系光学プラスチック
- 10.5 バイオエンブラ
  - 1) ポリアミド (PA) 系バイオエンブラ
  - 2) ポリカーボネート (PC) 系バイオエンブラ
  - 3) ポリエステル系バイオプラスチック
- 10.6 ナノ複合エンブラ
  - 1) ナノフィラーコンポジット

- 2) セルロースナノファイバー強化エンブラ
  - 3) ナノポリマーアロイ
- 10.7 材料と成形技術による高強度、高剛性化
    - 1) 射出成形法
    - 2) 熱可塑性プリプレグとのハイブリッド射出成形
    - 3) 押出プレス成形法
    - 4) クオドラント・プラスチック・コンポジット・ジャパンのGMTスタンピング成形システム
    - 5) 連続繊維強化素材を用いた賦形法

## 第11章 プラスチックの強度に関するQ&A

- 11.1 基本的な力学的用語及び性質
  - Q1: 力と応力の違いについて教えてください。
  - Q2: ひずみの意味について教えてください。
  - Q3: ひずみ速度とはどのような速度ですか。
  - Q4: フックの法則とはどんな法則ですか。
  - Q5: ヤング率とはどのような値ですか。また、ヤング率の大きさはどんなことを表していますか。
  - Q6: ポアソン比とはどんな値ですか。
  - Q7: 応力-ひずみ曲線とは、どんな曲線ですか。
  - Q8: 弾性限度とは、どのようなことですか。
  - Q9: 曲げ応力は、どのような応力ですか。
  - Q10: 衝撃強度とは、どのような強度ですか。
  - Q11: 応力緩和とはどのような現象ですか。
  - Q12: クリーブとはどのような現象ですか。
  - Q13: クリーブ破壊とはどのような現象ですか。
  - Q14: クリーブ限度とはどのようなことですか。
  - Q15: 疲労強度とはどのような強度ですか。
  - Q16: 疲労限度とはどのようなことですか。
  - Q17: 延性破壊及び脆性破壊は、それぞれどのような破壊ですか。
  - Q18: 応力集中とはどのようなことですか。
  - Q19: 許容応力とはなんですか。
  - Q20: 安全率とはなんですか。
- 11.2 プラスチックの強度に関する基本的性質
  - Q21: プラスチックが強度を発現する原理を教えてください。
  - Q22: ポリマーの分子量と強度の関係について教えてください。
  - Q23: 非晶性プラスチックでは、分子はどのような状態になっていますか。
  - Q24: ガラス転移温度とは、どのような温度ですか。また、強度との関係がありますか。
  - Q25: 結晶性プラスチックは、分子はどのような状態になっていますか。
  - Q26: 結晶性プラスチックの強度は、どのような要因によって決まりますか。
  - Q27: 粘弾性とはどのような性質ですか。また、プラスチックはなぜ粘弾性を示しますか。
  - Q28: プラスチックの粘弾性は、どのような特性に影響しますか。
  - Q29: 分子配向とはどのようなことですか。
  - Q30: 分子配向すると強度はどうなりますか。
- 11.3 試験法及び試験データの活用
  - Q31: シングルポイントデータとマルチポイントデータについて教えてください。
  - Q32: 多目的試験片とは、どのような試験片ですか。
  - Q33: ISO に準じた JIS 試験法の特徴について教えてください。

い。

Q34 : ISO に基づく引張試験は、旧 JIS (ASTM 法) とどんな点で異なりますか。

Q35 : シングルポイントデータに示された衝撃試験は、どのような試験法が標準試験法になっていますか。

Q36 : シャルビー衝撃試験法におけるエッジワイズとフラットワイズとはどのようなことですか。

Q37 : 衝撃試験データを実際の製品データに応用するには、どのようにしたらよいですか。

Q38 : 応力緩和特性データは製品設計でどのような使用状態の場合に適用できますか。

Q39 : クリブ変形やクリブ破壊データはどのような使用状態に適用できますか。

Q40 : 疲労試験データを実用データとして活用できますか。

#### 11. 4 ストレスクラックとソルベントクラック

Q41 : ストレスクラックとはどのようなことですか。

Q42 : ソルベントクラックとはどのようなことですか。

Q43 : 環境応力亀裂とはどのようなことですか。

Q44 : ストレスクラックとソルベントクラックはどのような点で異なりますか。

Q45 : ソルベントクラックの発生原理について教えてください。

Q46 : ソルベントクラック性を評価する方法を教えてください。

Q47 : クラックとクレーズは、どのように違いますか。

Q48 : クレーズが発生しても割れトラブルになることはありませんか。

Q49 : クラックが割れトラブルに結び付くメカニズムについて教えてください。

Q50 : プラスチック製品で、時間が経ってからクラックすることがあります。なぜですか。

#### 11. 5 劣化と寿命

Q51 : プラスチックの劣化とは、どのようなことですか。

Q52 : 熱エージングによる劣化とは、どのようなことですか。

Q53 : 熱劣化を防ぐ方法はありますか。

Q54 : 熱エージングによる劣化寿命はどのように予測しますか。

Q55 : 加水分解劣化とは、どのようなことですか。

Q56 : 紫外線劣化とは、どのようなことですか。

Q57 : 紫外線劣化を防止する方法を教えてください。

Q58 : 紫外線促進劣化試験と屋外暴露の関係について教えてください。

Q59 : X 線やガンマ ( $\gamma$ ) 線などの放射線を照射すると、劣化しますか。

Q60 : クリブ破壊寿命の予測法はありますか。

#### 11. 6 残留ひずみとアニール処理

Q61 : 残留ひずみと残留応力の違いについて教えてください。

Q62 : 分子配向ひずみとは、どのようなひずみですか。

Q63 : 割れ事故に結び付く残留ひずみ (凍結ひずみ) は、どのようなひずみですか。

Q64 : 射出成形工程では、どの工程で分子配向ひずみや残留ひずみが発生しますか。

Q65 : 分子配向ひずみが存在すると、実用上どのような障害になりますか。

Q66 : 分子配向ひずみの測定法について教えてください。

Q67 : 残留応力が存在すると、実用上どのような障害になりますか。

Q68 : 残留ひずみの測定法について教えてください。

Q69 : アニール処理とは、どのような方法ですか。

Q70 : アニール処理条件について、教えてください。

#### 11. 7 射出成形における製品設計及び成形条件と強度

Q71 : ウェルド部強度が低いのは、なぜですか。

Q72 : 製品の形状設計では、応力集中はどのような要因で起こりますか。

Q73 : 材料力学の式を用いて設計計算する場合の注意点を教えてください。

Q74 : 成形時に材料の熱分解を防ぐにはどのような点に注意すべきですか。

Q75 : 成形時に加水分解による材料の分解を防ぐには、どのような注意が必要ですか。

Q76 : 分子配向ひずみの発生を小さくするための成形条件の設定について教えてください。

Q77 : 残留ひずみの発生を小さくするための成形条件について教えてください。

Q78 : 成形時に生じる強度上の欠陥としては、どのような欠陥がありますか。

Q79 : 再生材をバージン材に混ぜて使用する場合、配合する再生材の混入率は制限がありますか。

Q80 : 再生材の使用では、どのような点を注意すべきですか。

#### 11. 8 割れトラブルの原因究明

Q81 : 割れトラブルの原因究明では、どのようなことに注意すべきですか。

Q82 : 割れトラブルは、発生率のばらつきが大きいのはなぜですか。その場合どのような検討方法がありますか。

Q83 : 割れの発生率が極めて低いトラブルは、どのように究明したらよいですか。

Q84 : 成形現場で材料が分解劣化しているかチェックする簡便的な方法を教えてください。

Q85 : 原因究明の加速再現試験の方法について教えてください。

Q86 : 成形品の分子量の測り方を教えてください。

Q87 : 成形品の密度の測り方を教えてください。

Q88 : 破壊の原因究明に当たって異物の分析について教えてください。

Q89 : プラスチック成形品の破面解析の方法について教えてください。

Q90 : 破面解析ではどのようなことがわかりますか。

#### 11. 9 割れトラブル事例

Q91 : インサート品の割れ不良は、なぜ金具周辺から放射状にクラックが発生するのですか。

Q92 : インサート金具周辺に発生する残留応力をアニール処理で除去できますか。

Q93 : PC 成形品を軟質ポリ塩化ビニル (PVC) 袋に入れておいたら、クラックが発生しました。原因と対策を教えてください。

Q94 : ABS 製のインサート成形品で、今までは問題なかったのに急にクラックが発生しました。原因と対策を教えてください。

Q95 : 圧入した金属シャフトの引抜力がばらつきます。原因と対策を教えてください。

Q96 : 通しボルトで締め付けておくとクラックが発生しました。対策を教えてください。

Q97 : PC 成形品の下穴をタップで雌ねじを加工したところ、時間が経つとねじ加工部分からクラックが発生しました。タップ加工には切削油を使用しています。原因と対策を教えてください。

Q98 : 真鍮製の金具をインサートしたPP成形品を80℃前後の環境で使用していたら、インサート金具周囲が変色し、PPが脆くなりました。原因と対策を教えてください。

Q99 : ガラス繊維強化の半芳香族ポリアミドの成形品で剛性が低いのですが、どうしてですか。金型温度は90℃で成形しました。

Q100 : POM成形品に衝撃力を加えると、ゲート仕上げ箇所から脆く割れます。原因と対策を教えてください。

#### 11. 10 ポリマーとプラスチック

Q101 : ポリオレフィンとは、どんなプラスチックですか。

Q102 : ホモポリマーとコポリマーの違いは何ですか。

Q103 : 分岐ポリマーとは、どんなポリマーですか。

Q104 : ポリマーの立体規則性とは、どんなことですか。

Q105 : ポリマーアロイとは、どんなプラスチックですか。

Q106 : 充填材を充填すると、どんな性質が向上しますか。

Q107 : フィラーナノコンポジットとは、どんなものです

か？

Q108 : エンジニアリングプラスチック（エンブラ）とは、どんなプラスチックですか。

Q109 : バイオプラスチックとは、どんなプラスチックですか。

Q110 : 光学用プラスチックとは、どんなプラスチックですか。

コラム 現場からのひとこと 11 ポリマーとプラスチック

#### 索引

※ 本書では、TM、®、©は割愛して表記しています