樹脂の成形加工時に発生するアコースティックエミッション (AE)の時間・周波数解析による発生機序の解明

滋賀県立大学 エ学部 機械システム工学科 田中 昂

1. はじめに

2015年に開催された国連サミットで採択された Sustainable Development Goal(SDGs, 持続可能な開発 目標)において設定された目標の一つ「Responsible consumption and production(つくる責任 つかう責任)」 のもと、リユース・リサイクル・リデュースが重要視されるようになっている⁽¹⁾. その中でも、樹脂は軽 量さや加工のしやすさから、自動車産業をはじめとする様々な産業において金属部品の代替品として用 いられているだけでなく、製品の包装にも用いられており、日々膨大な量の樹脂の廃棄が発生している. 環境負荷低減のために、樹脂のリサイクル・リデュースが推進されている. 日本においても、プラスチ ック資源循環促進法、自動車リサイクル法など種々の法律が制定され、樹脂の回収・リサイクルが進め られている⁽²⁾.

樹脂は、押出成形によって作られたペレットと呼ばれる粒状の樹脂を原材料として、射出成形する ことで製品を生産する.これらの成形加工では、樹脂を溶融させる「加熱」、金型に溶融した樹脂を流入 させ、保圧して金型内の圧力を均一化させることで形を作る「金型」、樹脂圧力樹脂を冷やして固化させ る「冷却」の工程がある⁽³⁾.新品の素材のみを使って製造されるバージン材と呼ばれる樹脂は、一定の性 質が保たれており、安定した成形により品質が均一な製造に向いている.しかし、バージン材であって も、金属材料と比較して、樹脂材料は材料特性(レオロジー特性)のばらつきが大きいことが知られて おり、成形不良の原因となる.成形不良が生じると、再び溶融しペレット状に加工する必要があるため、 環境負荷が高くなってしまう.さらに、一度成形・製品化されたのちに回収されたリサイクル樹脂は、 リサイクル元の製品の使用環境などに依存する劣化度合いや、材料の分子構造の細かな違いを分別でき ないこと、ペレット状に加工するためにバージン材よりも加熱回数が多く品質劣化が生じることなどか ら、樹脂のレオロジー特性のばらつきがさらに大きくなってしまう⁽⁴⁾.

樹脂業界において、リサイクルにかかわるメーカーとして、リサイクル樹脂をペレット状に加工し販 売する材料メーカーとペレット状に加工されたリサイクル樹脂を購入し加工する成形加工メーカーがあ る.一般的なリサイクル過程において、材料メーカーで実施する一般的な樹脂のレオロジー特性計測で は、溶融した樹脂のレオロジー特性評価⁽⁵⁾と実際に押出成形した固形樹脂の材料試験⁽⁶⁾が実施されている. しかし、これらの試験で得られるレオロジー特性は平均的な特性でありレオロジー特性のばらつきにつ いては評価されていない.成形加工メーカーでは、材料メーカーから購入したリサイクル樹脂を加工す る際には、材料メーカーより得たレオロジー特性を基に加工条件を試行錯誤して設定している⁽⁷⁾が、リサ イクル樹脂のレオロジー特性のばらつきに対して加工条件を固定化すると成形不良が多くなってしまう という問題がある.

この問題を解決するためには、加工中の樹脂のレオロジー特性を把握し、その特性に応じて加工条件 を調整することが求められる.一般的な溶融樹脂のレオロジー特性計測に用いられる装置は計測専用機 であり、実加工状態での計測は、成形加工機に組み込んだ形での実装が主となっている⁽⁸⁾.既存の成形加 工機に後から実装可能なレオロジー特性計測法が必要である.本研究では、溶融樹脂の押出成形時に発 生する弾性波であるアコースティックエミッション(Acoustic emission, AE)に着目したレオロジー特性 評価の基盤を構築することを目指す.

2. 本研究の目的

本研究では、溶融樹脂の押出成形時に発生するアコースティックエミッションを計測するために、成 形加工機に外付けできるアコースティックエミッションセンサを用いる.アコースティックエミッショ ンが押出成形時に発生することを示し、加工条件に対してアコースティック信号が変化どのように変化 するのかを調査する.さらに、アコースティックエミッション信号の周波数解析を行うことで、どのよ うな特徴を有するのかを可視化する.

3. 実験装置および実験条件

本研究で用いた実験装置および実験条件について述べる.

まず,押出成形を行う機械としてキャピラリーレオメータ⁽⁹⁾を使用 した.図1にキャピラリーレオメータの概略図を示す.キャピラリー レオメータは,ペレット状の樹脂を金型に入れた後に金型を加熱する ことで樹脂を溶融させ,金型上部からピストンにより荷重をかけて樹 脂に圧力をかけることで,金型下部の小径穴から溶融樹脂が押し出さ れる構造である.押し出された樹脂がストリング状になって排出され る.この小径穴横にアコースティックエミッションセンサを配置し, センサの出力電圧を計測した.



タの概略図

出力電圧の時系列データの計測条件は、サンプリング周期 10 µs (サンプリング周波数 100 kHz)、データ数 500,000 点(計測時間 5 s) とし

た. 用いる樹脂は,分子量が異なる3種類のポリスチレン(PS:679K,G9305,HF77)とした⁽¹⁰⁾. これ らのポリスチレンは,レオロジー特性に関する研究において一般的に用いられる樹脂材料である.加工 条件として,樹脂を溶融させる温度を180,200,220℃の3種類,キャピラリーレオメータのピストン の荷重を0.5,1,3kgの3種類とした.

4. 計測されたアコースティックエミッション信号

本章では、計測されたアコースティックエミッション信号を示す. 樹脂は PS:679K を用い、樹脂を溶 融させる温度を 180 ℃とし、ピストンの荷重を 1kg としたときに計測されたアコースティックエミッシ ョン信号を図 2 に示す. 赤線が計測されたアコースティックエミッション信号であり、青線は後で説明 する解析データの切り出しに用いる上側包絡線である.

まず,図2のアコースティックエミッション信号において,0秒から5秒の全域にわたって周期的に 生じているスパイク状(インパルス応答)の信号について説明する,キャピラリーレオメータでは,樹 脂を溶融させる温度を一定にするため,温度をフィードバックしヒータのONとOFFを切り替えるBang-Bang制御を行っている.このヒータのONとOFFを切り替える電磁弁が作動したとき,このスパイク状 の信号が計測されることから,溶融した樹脂の押出成形によって発生するアコースティックエミッショ ン信号ではないことを確認した. これに対し、2.5s付近から4.3s付近まで発生している過渡的な信号は、実験時の観察よりピストンが 溶融した樹脂に接触してから樹脂が金型の小径穴から出力され終わるまでに発生している信号であるこ とが確認できた.そのため、この過渡的な信号を解析対象とする.



図 2 アコースティックエミッション信号の計測例 (PS:679K, 溶融温度 180 ℃, 荷重 1 kg)

解析対象のデータのみを抽出するために,以下の信号処理を行った.信号処理には MATLAB を用いた.まず,アコースティックエミッション信号の包絡線を求め,インパルス応答の包絡線を除去するために,2次のバターワース特性のローパスフィルタを適用し平滑化した.ローパスフィルタのカットオフ周波数は10 Hz とした.次に,平滑化された包絡線に対して,閾値を超えてから閾値を下回るまでの時間範囲を検出し,その前後0.2s ずつを追加した時間範囲をアコースティックエミッションの発生区間とした.この範囲を0と1の二値関数で表現し,アコースティックエミッション信号に駆けることで,解析データを抽出した.

5. アコースティックエミッション信号の時系列信号解析

本章では、アコースティックエミッション信号の時系列信号解析を行った結果について述べる.加工 条件とアコースティックエミッション信号の特徴量との関係を調査した.

まず,アコースティックエミッション信号の継続時間について述べる.アコースティックエミッション信号の継続時間は押出成形の加工時間と対応しており,キャピラリーレオメータに投入する樹脂の質量および溶融した樹脂の粘度と関係がある.図3に各ポリスチレン,各温度,各荷重とアコースティックエミッション信号の継続時間の関係を示す.図3からはいずれのポリスチレンにおいても,加工条件との明確な相関性は見受けられない.

次に,アコースティックエミッション信号の包絡線の面積(AEエネルギ)について述べる.アコース ティックエミッション信号は物理的には速度信号であり,速度時系列信号 dx(t)/dt の包絡線の面積(包絡 線 AE 面積)は,エネルギの放出量と相関がある.今回実験に用いた一般的なアコースティックエミッシ ョンセンサは共振周波数近辺の周波数を用いるため,電圧値と物理量の変換に用いるセンサゲインが周 波数に依存して変化する.そのため,一般的なアコースティックエミッションエネルギは物理量への変 換は行わず,電圧信号の包絡線の面積を計算し,AEエネルギ(単位は[Vs])とする.図4に各ポリスチ レン,各温度,各荷重とAEエネルギの関係を示す.全体的な傾向として,AEエネルギは樹脂を溶融す



図3 各ポリスチレン,各温度,各荷重とアコースティックエミッション信号の継続時間の 関係



図4 各ポリスチレン,各温度,各荷重とアコースティックエミッション信号の継続時間の 関係

る温度の上昇とともに大きくなっていることが確認できる.一般的に,樹脂を溶融する温度が高くなる ほど粘度が低下することが知られており,粘性によるエネルギ散逸が減少したことにより,計測される AE エネルギが大きくなったと思われる.

これらの結果より, AE エネルギは樹脂のレオロジー特性の一つである粘度と反比例するパラメータと 考えられる.

6. アコースティックエミッション信号の時間周波数解析

本章では、アコースティックエミッション信号の短時間フーリエ変換を用いた時間周波数解析について述べる.本報告で用いた短時間フーリエ変換の解析パラメータは、窓関数は hann 窓を用い、窓幅を 1024 点、オーバーラップ数を 96 点とした.解析データは図 3 で切り出した時間範囲とした.

図6にPS:679Kの樹脂を溶融する温度180℃,荷重0.5kgの短時間フーリエ変換結果を示す.図7(a) は斜めの角度から見た全体図である.25kHz~30kHzに大きなピークが確認できる.上から見た図7(b) は25kHz~30kHzを拡大した図である.この図から,近い周波数で3つの峰が確認できる.各ピーク周 波数が慣性と弾性からなる共振周波数であると仮定すると,3つの特性が混ざった樹脂である可能性が ある.ページの都合上省略するが,他の加工条件のデータでは3つの峰または2つの峰が確認できた. レオロジー特性以外の樹脂特性(相対的な質量パラメータである分子量)との関連付けもできるデータ ではないかと考える.

7. まとめ

本研究で押出成形時に発生するアコースティックエミッションの計測を実現した. さらに, 計測した アコースティックエミッション信号の時系列信号解析から,成形加工の過程を間接的に観察できること を示すとともに,成形加工条件と時系列信号解析から得られる各アコースティックエミッションのパラ メータの関係を求め,成形加工条件とアコースティックエミッションのエネルギ量に関連を見出した. また,短時間フーリエ変換を用いたアコースティックエミッション信号の時間周波数解析を行い,分子 量が混在している特性と思われる峰を確認した. 今後,それぞれの峰の時間変動特性を行うとともにレ オロジー特性との関係性を評価することで,ばらつきを考慮したレオロジー特性評価法の確立を試みる.

謝辞

本研究を遂行するにあたり,公益財団法人 天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました.また, 滋賀県立大学工学部材料化学科 木田拓充講師には,本研究で実施した実験に様々なご協力をいただき ました.ここに記して謝意を示します.

参考文献

- (1) 高﨑緑, 松尾雄一, 八尾滋, Ⅲ. SDGs (環境・エネルギー)と成形加工, 成形加工, Vol. 33, No. 10 (2021), p. 336.
- (2) 筑紫圭一, プラスチックをめぐる法政策の展開, 環境法政策学会誌, Vol. 2022, No. 25 (2022), pp. 28-38.
- (3) 今冨芳幸, プラスチック光学部品の成形加工, 光学, Vol. 25, No. 2 (1996), pp. 82-87.
- (4) 松本正人, リサイクルを考慮した成形加工法の開発, 成形加工, Vol. 9, No. 4 (1997), pp. 258-262.



図 6 短時間フーリエ変換結果 (PS:679K, 溶融温度 180 ℃, 荷重 0.5 kg)

- (5) 上田重幸, 溶融樹脂のレオロジー, 繊維と工業, Vol. 1, No.3 (1968), pp. 170-176.
- (6) 竹田英俊, 樹脂材料の高速引張試験, マテリアルライフ学会誌, Vol. 20, No. 3 (2008), pp. 118-124.
- (7) 竹田英司, 竹中一博, 押出成形, 成形加工, Vol. 33, No. 7 (2021), pp. 222-226.
- (8) 村田泰彦, プラスチック射出成形金型内における現象計測のためのセンサ応用技術, 精密工学会誌, Vol. 81, No. 5 (2005), pp. 415-420.
- (9) JIS K7199:1999, プラスチックーキャピラリーレオメータおよびスリットダイレオメータによるプラスチックの 流れ特性試験方法.
- (10) 佐藤尚弘, 高分子の分子量, 高分子, Vol. 62, No. 9 (2013), pp. 525-528.