

領域適応型進化的アルゴリズムによる非線形材料定数の同定

日大生産工 (院)
日大生産工
名古屋大

○中尾 美結
平山 紀夫
松原 成志朗

日大生産工 (院)
サイバネットシステム (株)
東北大

染宮 聖人
山本 晃司
寺田 賢二郎

1. 緒言

高分子材料は、弾性固体と粘性流体の両方の特性を併せ持つ粘弾性体であり、温度や時間に依存した非線形材料挙動を示す。そのため、高分子材料の材料挙動を数値計算等で表現するためには、適切な材料構成則を用意し、その材料構成則に含まれる複数の非線形材料定数を同定する必要がある。

一方で、これらの非線形材料定数値の変数域は、十数桁以上の広範囲で定義される場合がある。そのような場合には、通常の最適化手法では最適な材料定数を探索することが困難である。そのため従来の研究では、各非線形材料定数に対して探索領域を狭めて上下限値を設ける必要があった。

そこで本研究では、広範囲な探索領域を探索状況に応じて適切に変化させるアダプティブ領域探索法 (Adaptive Range Search: ARS) を開発し、進化的アルゴリズムである差分進化法 (Differential Evolution: DE) と粒子群最適化法 (Particle Swarm Optimization: PSO) に適用した。ここでは、それぞれの最適化手法をARS-DE, ARS-PSOと称す。そして、熱可塑性エポキシ樹脂の非線形材料定数の同定問題に対してARS-DE, ARS-PSOによる最適化計算を実施し、従来のDE, PSOと同定精度や収束性を比較することで、ARS-DE及びARS-PSOの有用性を評価した。

2. ARS-DE及びARS-PSOのアルゴリズム

DEとPSOは、最適化プロセスが平易でありながら、収束性・ロバスト性に優れ、非線形問題や多峰性問題など様々な最適化問題に適用できることが知られている。これら従来のDE, PSOでは最適化計算開始から終了まで探索領域は一定である。一方で、本研究で提案するARS-DE及びARS-PSOは、探索する領域を探索個体初期化毎に適宜変化させて更新する。図1に、アダプティブ領域探索法のフローチャートを示す。探索領域の更新は、全探索個体の中で

最良の評価値を得た個体の位置情報 ($gbest$) を基に以下のステップで行う。

[Step1] 実行回数に応じて、以下の方法で新探索領域の基準値を設ける。

《実行1回目》 $gbest$ を基準値とする。

《実行2回目以降》 直近の $gbest$ とこれまでで最良の $gbest$ の間を $p : 1 - p$ で分割したときの内分点を基準値とする。今回は、 $p = 0.3$ とした。

[Step2] 現探索領域をlogスケールに変換し、「基準値 $\pm m$ 」を計算する。また、 m の値は最適化アルゴリズムの探索能力に応じて設定するパラメータで、本研究では $m = 3$ とした。

[Step3] Step2で計算した領域を実スケールに戻し、次の探索で用いる新探索領域とする。

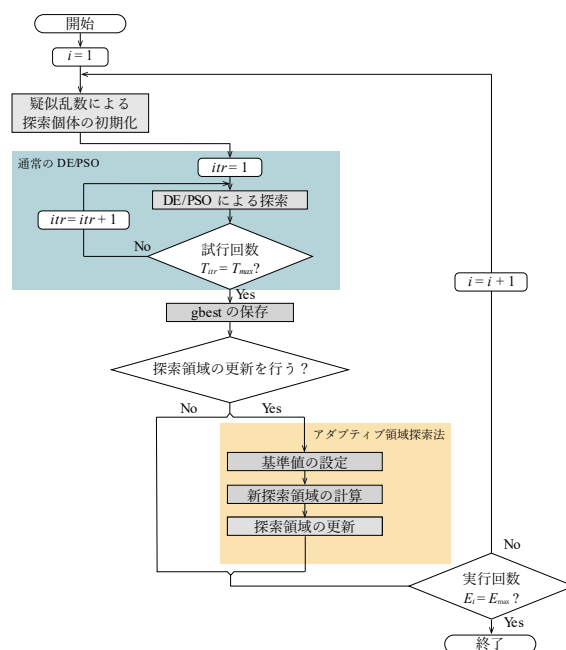


図1 フローチャート

本研究では、探索個体数 N を50、最大実行回数 E_{max} を20、最大試行回数 T_{max} を500、初期探索領域を $10^{-d} \sim 10^d$ ($d = 5, 6, 7, 8, 9, 10$)の6水準として、材料定数の同定を行った。また、再現性を確認するため、これらの最適化計算を各水準に対してそれぞれ10回実施した。

3. 材料定数の同定

材料定数の同定は、熱可塑性エポキシ樹脂に対して、温度3水準（20℃、40℃、60℃）及びひずみ速度3水準（0.1mm/min、0.5mm/min、1mm/min）の計9水準の単軸負荷－除荷試験の材料挙動を用いて行った。また、本研究では等方性弾塑性・クリープ・損傷複合モデル¹⁾を使用し、式(1)に示した各水準の材料構成則の応答における応力値 $\sigma^{[i,\alpha]}$ と実験値 $\hat{\sigma}^{[i,\alpha]}$ の平均二乗和誤差を表す以下の誤差関数 g を最小化するように材料定数の同定を行った。

$$g = \sum_{\alpha=1}^{n_{test}} \frac{1}{n_{step}^{[\alpha]}} \left(\sum_{i=1}^{n_{step}^{[\alpha]}} (\sigma^{[i,\alpha]} - \hat{\sigma}^{[i,\alpha]})^2 \right) \quad (1)$$

ここで、 n_{test} は材料試験の各要因の水準数、 $n_{step}^{[\alpha]}$ は各要因の水準 α において抽出した実験データ数である。

4. 同定結果

はじめに、初期探索領域を $10^{-d} \sim 10^d$ （ $d=5, 6, 7, 8, 9, 10$ ）で最適化計算を10回行い、各手法で20以下の評価値を得られる初期探索領域の調査を行ったところ、DE及びPSOはどの初期探索領域でも20以下の評価値を得られなかった。その一方で、ARS-DEは $d=5 \sim 10$ 、ARS-PSOは $d=5 \sim 9$ で20以下の評価値を得ることができた。また、 $d=10$ のときのDE及びARS-DEの最良の評価値を得たときの同定結果を図2、3に示す。図2、3からわかるようにDEでは実験結果に対するフィッティングが不十分であったが、ARS-DEでは全ての実験水準で良好に実験曲線にフィッティングしていることがわかる。

次に、 $d=5, 10$ のときの総試行回数（最大実行回数 $E \times$ 最大試行回数 $T=10000$ 回）における各手法が得た評価値の平均的な収束過程を図4に示す。図4からDE、PSOよりもアダプティブ領域探索法を組み込んだARS-DE、ARS-PSOの方が平均的に優れた評価値を得たことが分かった。特に、ARS-DEはARS-PSOよりも最終的な評価値が小さく、少ない試行回数で収束していることがわかった。

5. 結言

本研究では、熱可塑性樹脂の同定問題に対して、DEとPSOにアダプティブ領域探索法を組み込んだARS-DE及びARS-PSOを適用し、最適化計算を行った。その結果、従来のDE及びPSOでは困難であった $10^{-10} \sim 10^{10}$ のような非常に広範な探索領域に対しても十分な精度で熱可塑性樹脂の非線形材料定数の同定を行うことが

できた。特に、ARS-DEはARS-PSOよりも平均的に良好な評価値を得ることができ、各手法の中でも特に高い探索性能を有していることが分かった。

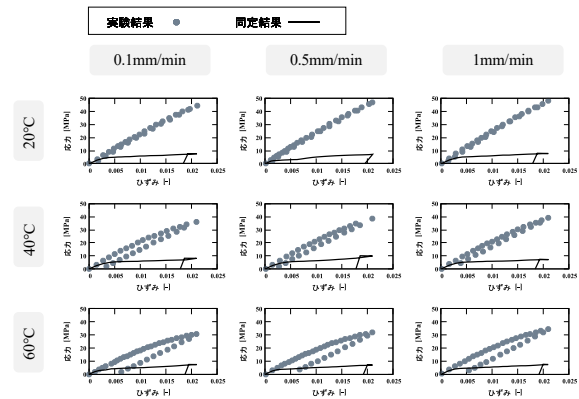


図2 $10^{-10} \sim 10^{10}$ における同定結果（DE）

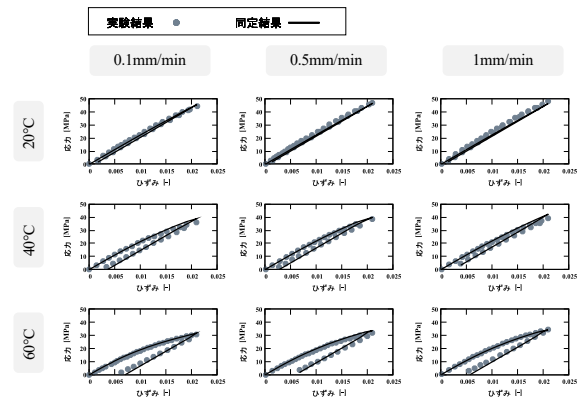
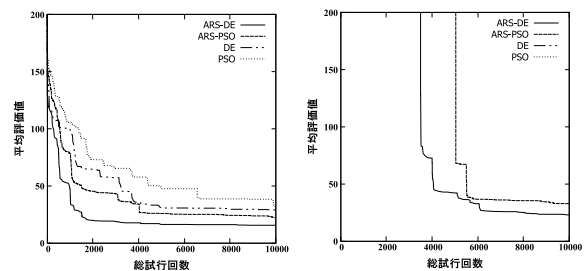


図3 $10^{-10} \sim 10^{10}$ における同定結果（ARS-DE）



(a) $10^{-5} \sim 10^5$ (b) $10^{-10} \sim 10^{10}$

図4 評価値の平均的な収束過程

参考文献

- 1) 松原 成志朗, 荒川 裕介, 加藤 準治, 寺田 賢二郎, 京谷 孝史, 上野 雄太, 宮永直弘, 平山 紀夫, 山本 晃司, “弾塑性・クリープ・損傷複合モデルによる繊維強化プラスチックの分離型マルチスケール解析”, 計算工学会論文集, Vol. 2014, 論文番号20120014