

温度とひずみ速度に依存する樹脂の汎用 FEM による弾塑性モデリング

清水 徹^{*1}, 佐藤 維美^{*2}, 渡辺 洋一^{*3}, 小林 卓哉^{*4}

Elasto-plastic modeling for resin materials depending on temperatures and strain rates

Toru SHIMIZU^{*1}, Masami SATO^{*2}, Yoicni WATANABE^{*3} and Takaya KOBAYASHI^{*4}

^{*1} Mechanical Design and Analysis
Fuda 1-40-2, Chofushi, Tokyo, 182-0024 Japan

Highly functionalized polymer materials are demanded to improve performance by computer simulation because of its economical efficiency. Recently, constitutive law including the effect of dumping are needed for modeling such materials. Elasto-viscous models are generally selected in this case as it can represent dumping conveniently, while elasto-plastic models can be an effective option when we consider problems of wide strain range. Based on above, we need to apply proper constitutive law to practical design of commercial products. Therefore we remarked at elasto-plastic models for the key step. The aim in this paper is representing yield point of resin materials which depend on temperatures and strain rates by adopting Cowper-Symonds equation. We paid attention to take simple ways so it might be manageable when dealing with some similar analyses.

Key Words : PETG, resin, temperature, strain rate, dependency, Cowper-Symonds equation

1. 結 言

スポーツ用品向けの高機能材料は、他の樹脂製品に比べて経済的な付加価値が高いため、シミュレーションによる性能改善に対する要求が高い。最近では、減衰の効果も含めた材料構成則の選択が必要とされている。一般に、減衰の表現に対しては粘弾性によるモデリングが簡便であるが、高いひずみ領域を含む問題に対しては、ひずみ速度依存性をもった弾塑性モデルの適用も有効な手段となり得る。また、これらの構成則を適切に使い分けて設計に応用することも必要である。

そのための足掛かりとして、ここでは弾塑性モデルに着目した。本研究では、金属で実績のある Cowper-Symonds 則を用いて温度とひずみ速度に依存して変化する樹脂の降伏応力点を再現した。本研究では簡易化した手法を適切に取り入れることで、実装性と解析精度のバランスに配慮した。同様の問題に取り組む際に扱いやすい方法になるものと期待している。

2. 実験データ

今回は、PETG の単軸圧縮試験のデータを使用した。PETG は PET と非常によく似た物性を持つが、大ひずみ域での結晶化の有無に大きな違いがある。PETG は PET と比較するとほとんど結晶化が見られず、透明性や成形性に優れた材料といえる。以下、25[°C]、60[°C]、80[°C]、90[°C]、100[°C]における計測データの引用である。試験片の厚さを観測しながら圧縮を加えることで、変形前後で体積不変の仮定のもと真応力-真ひずみ関係のデータを得ている。

図 1 (25[°C])、図 2 (60[°C])では、ひずみの小さい域で弾性的な挙動を示し、明瞭なピーク点を経て軟化し、その

^{*1}, ^{*4} 正員, 株式会社メカニカルデザイン (182-0024 東京都調布市布田 1-40-2)

^{*2}, ^{*3} 株式会社メカニカルデザイン

E-mail: comm@mech-da.co.jp

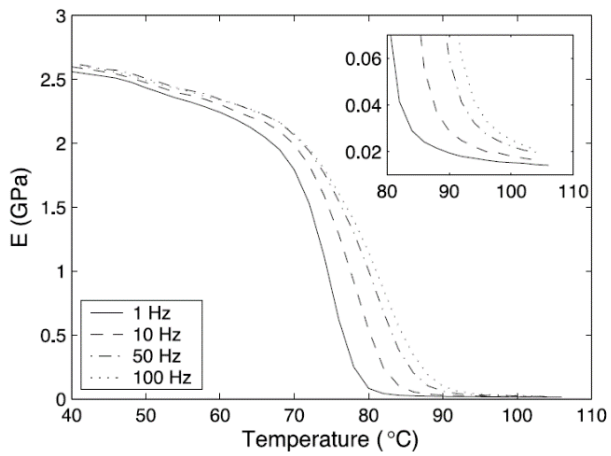


Figure 1

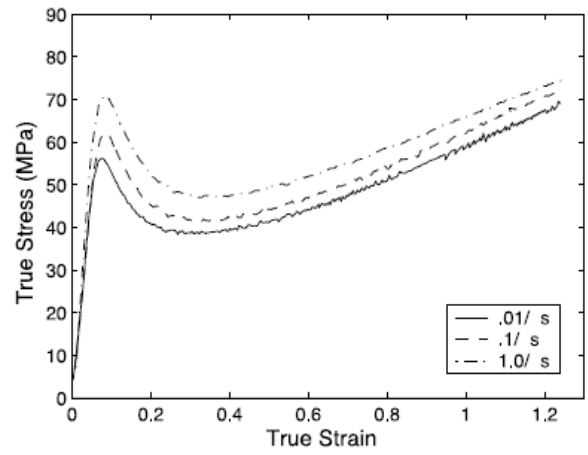


Figure 2

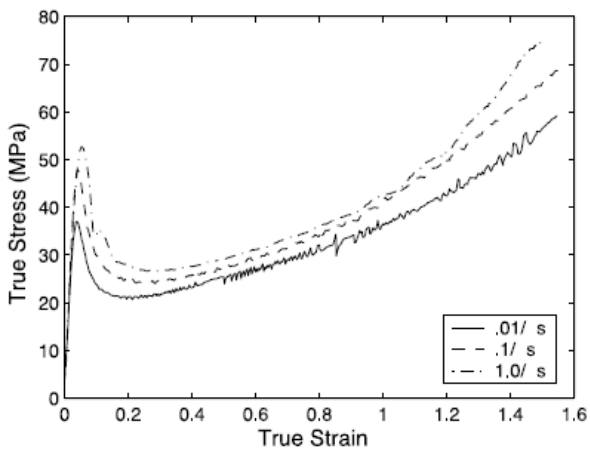


Figure 3

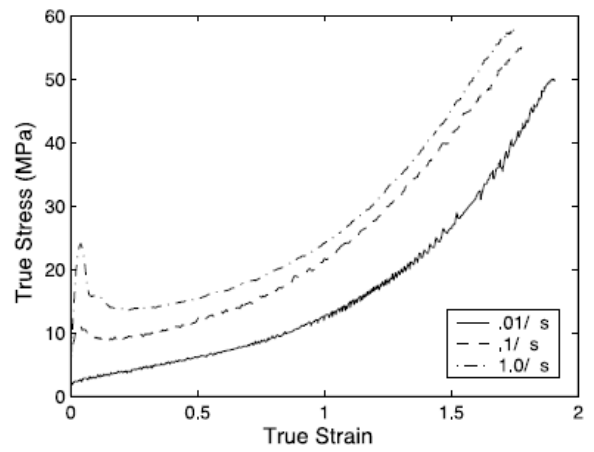


Figure 4

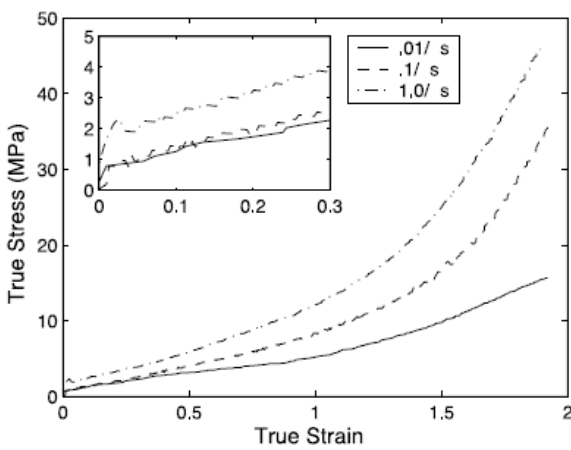


Figure 5

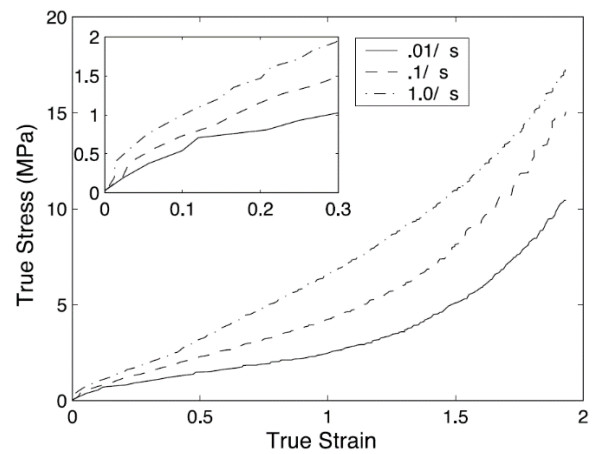


Figure 6

後は単調に増加する傾向が現れている。図 3(80[°C])の測定域はガラス転移点を含み、ひずみ速度に対する依存性が顕著に見られる。ひずみ速度が小さい 0.01[1/s]の場合には、ピーク点は消失している。図 4(90[°C]), 図 5(100[°C])ではすべてのひずみ速度においてピーク点消失し、ほぼ単調な挙動を取っている。図 4(90[°C])の場合に、大ひずみ域でのひずみ速度依存性が見られる。

これらの図から降伏応力を正確に推定することは困難であるが、今回は応力-ひずみ関係のピーク高さで代用した。なお、90[°C], 100[°C]の場合は明確なピークは見られないので、ひずみごく小さい領域での弾性限度付近を降伏応力とみなしている。

引用した文献では応力とひずみを真値で整理してあるが、ピーク点が見れる 10%程度以下のひずみ領域では真値と公称値の差異が小さいことを理由に、今回の検討では真値と公称値を区別しない。

図 1 は温度と周波数に依存したヤング率の変化（ガラス転移点を含む）を表している。今回の解析では、温度ごとのヤング率の値としてこの図の 10[Hz]のデータを使用した。

3. Cowper-Symonds 則のパラメータの決定

Cowper-Symonds のべき乗則は次式で表される。あるひずみ速度における降伏応力は、ひずみ速度に対してべき乗の関係で与えられることを表す。

$$\epsilon_p = D(R - 1)^n$$

$$\epsilon_p: \text{相当塑性ひずみ速度}, R: \text{降伏応力比} \left(= \frac{\text{動的な降伏応力}}{\text{静的な降伏応力}} \right), D, n: \text{定数}$$

上式の両辺で常用対数を取って整理すると次が得られる。

$$\log_{10}(R - 1) = \frac{1}{n} \log_{10} \epsilon_p - \frac{1}{n} \log_{10} D \quad (1)$$

式 (1) より、横軸にひずみ速度、縦軸に降伏応力比をとって対数目盛で表せば、傾きと切片から Cowper-Symonds 則のパラメータを決定できる。そこで、まず降伏応力比を求める。

横軸にひずみ速度、縦軸に降伏応力をとった図は次のようになる。図8は図7を原点付近で拡大したものである。

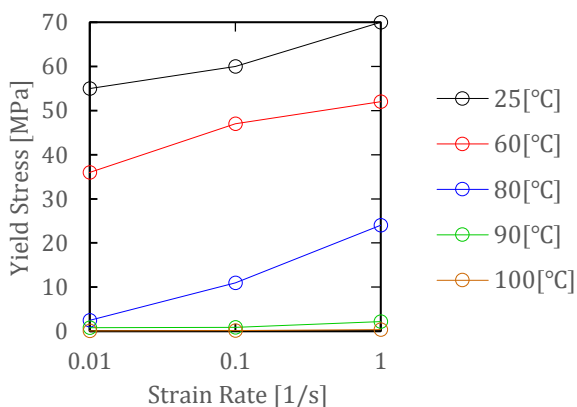


Figure 7

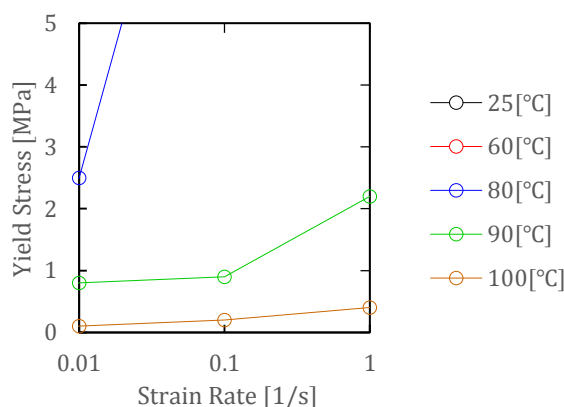


Figure 8

降伏応力比 R を与える際、静的な降伏応力を一つ定める必要がある。今回引用した実験値はひずみ速度が3種類のみであるため、静的降伏応力の基準を取ると2点となり、Cowper-Symonds 則が適用可能かどうかの判断が困難になる。そのため、ここでは静的降伏応力としてひずみ速度 0.001[1/s]における降伏応力点を推測し、図9、図10のように加えた。

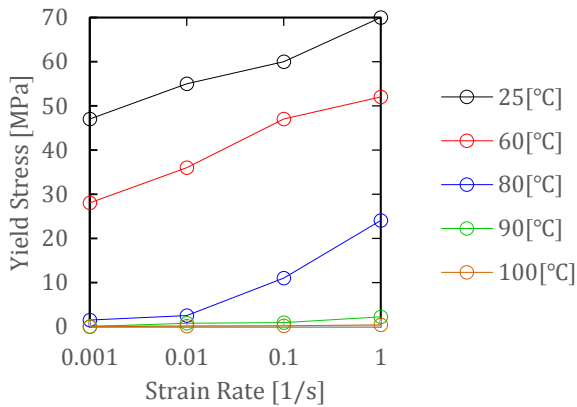


Figure 9

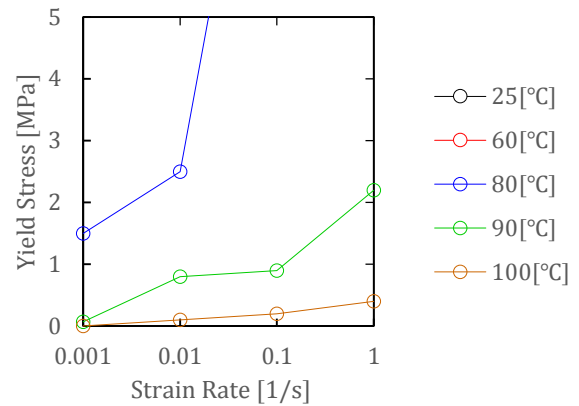


Figure 10

ひずみ速度0.001[1/s]を静的な基準に取り, 0.01[1/s], 0.1[1/s], 1.0[1/s]の3つの降伏応力比 R を計算する. 横軸をひずみ速度, 縦軸を $R - 1$ とし, 対数目盛りで表したグラフは次のようになる. 破線は, 最小自乗法による近似直線を表す. 実験結果は, 直線によってほぼ近似することができ, Cowper-Symonds則を適用することが可能と判断できた. ただしガラス転移点近傍である80°Cの場合は, 傾きが特異的に大きい. これはひずみ速度によってピーク高さが大きく異なることを示しており, 図4で説明した傾向と整合している. また温度が低いほど切片が高い値を示す. これは温度が低いほど降伏点が高いためである.

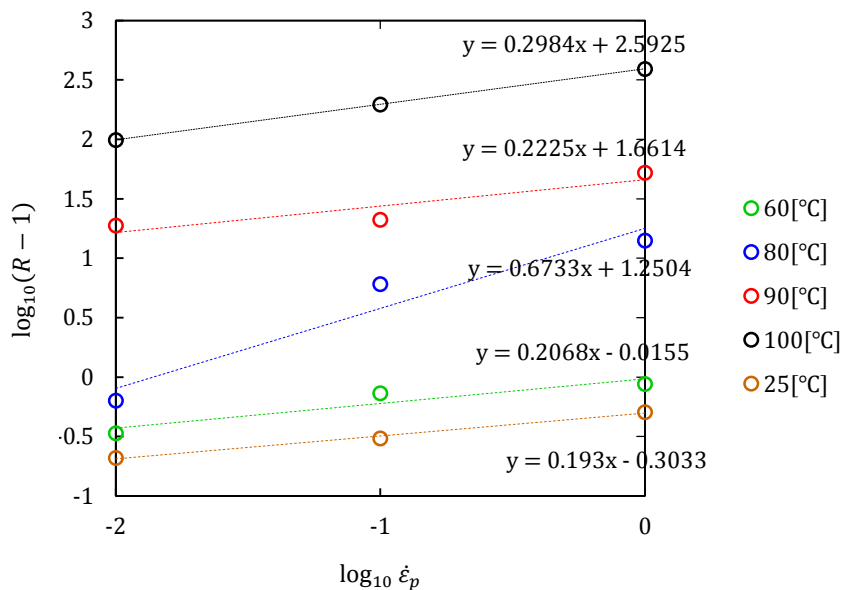


Figure 11

図10の近似式を $y = ax + b$ とすると, 式 (1) から

$$n = \frac{1}{a}, D = 10^{-n \times b}$$

となる. こうして求めた D と n の温度変化をプロットすると図12, 図13が得られる.

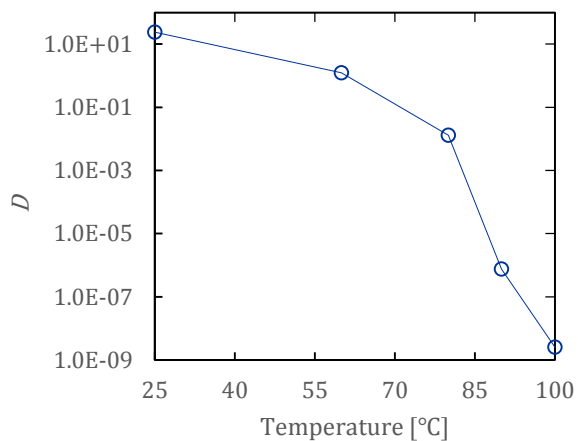


Figure 12

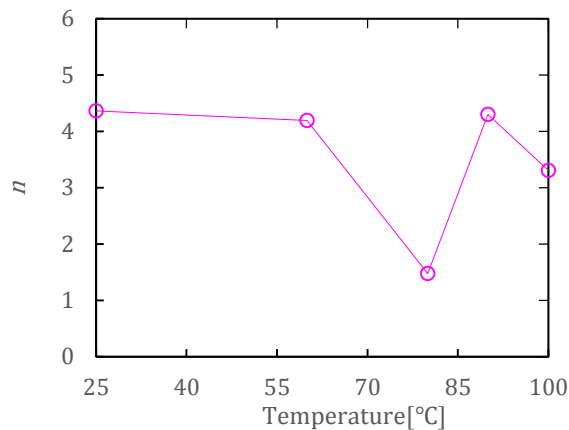


Figure 13

図から約80[°C]で傾向が変化する様子を読み取ることができる。これは80[°C]付近でPETGがガラス転移点を持つことに対応している。

一般に、物性はガラス転移点付近で急激に変化して、それ以外の領域では緩やかに、あるいはほぼ一定に推移すると考えられる。そこで、図14、図15の破線で示すような傾向を持つものと大掴みに仮定を置き、簡易にパラメータ D と n を求めた。

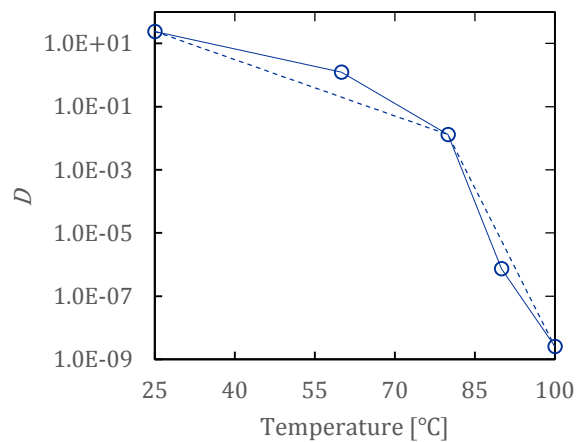


Figure 14

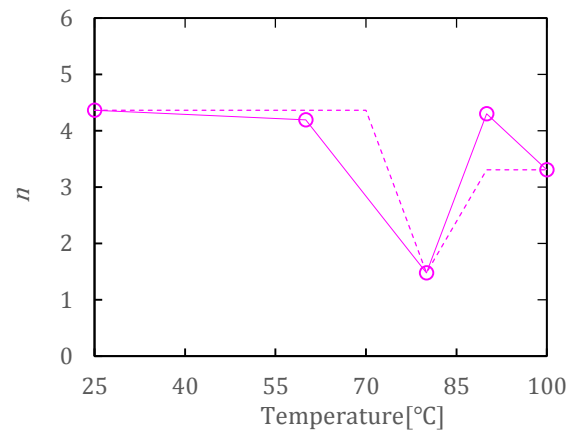


Figure 15

こうして求めた D と n を用いて、次に汎用 FEM(Abaqus 6.11 student edition)による解析を行う。

4. 汎用 FEM による解析

解析のための入力ファイルには、軸対称要素の単軸引張りのモデルを使用した。

温度ごとのヤング率とピーク高さ、Cowper-Symonds則のパラメータはあらかじめ入力して固定とし、初期温度とひずみ速度を変化させて個々に解析を行った。

解析結果からピーク値を抜き出し、実験値のグラフ上に重ねてプロットすると以下が得られた。赤色はひずみ速度0.01[1/s]、青色は0.1[1/s]、黒色は1.0[1/s]を表す。

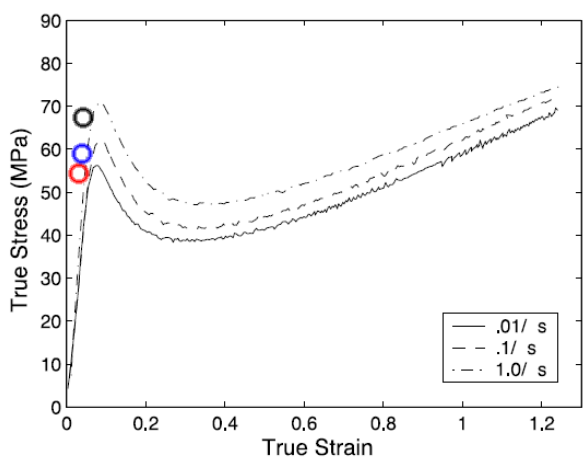


Figure 16 25[°C]

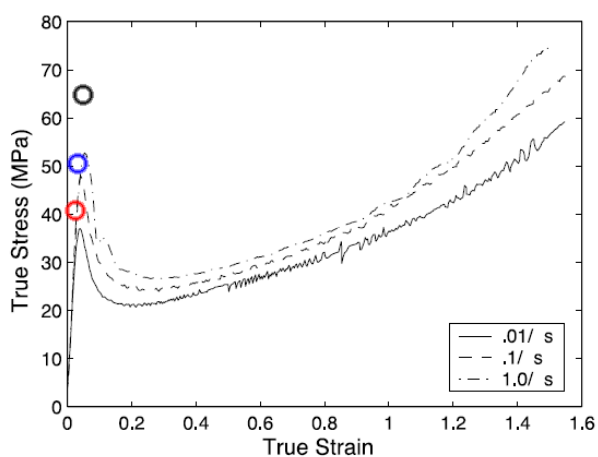


Figure 17 60[°C]

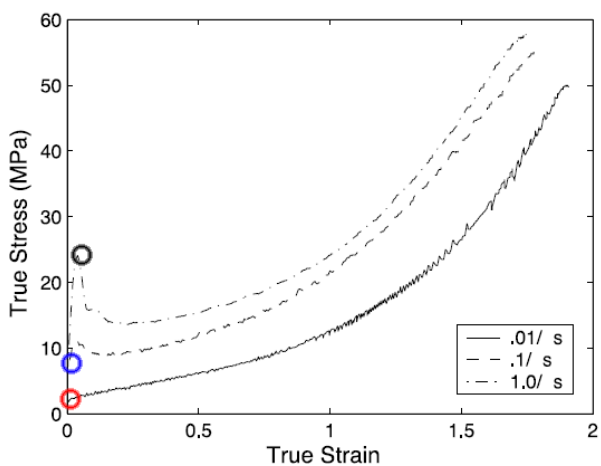


Figure 18 80[°C]

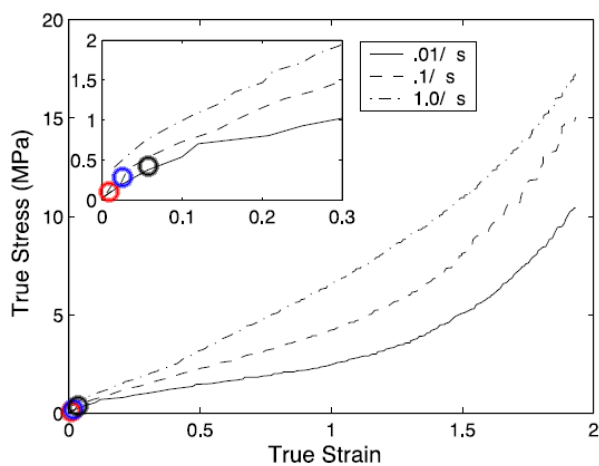


Figure 19 90[°C]

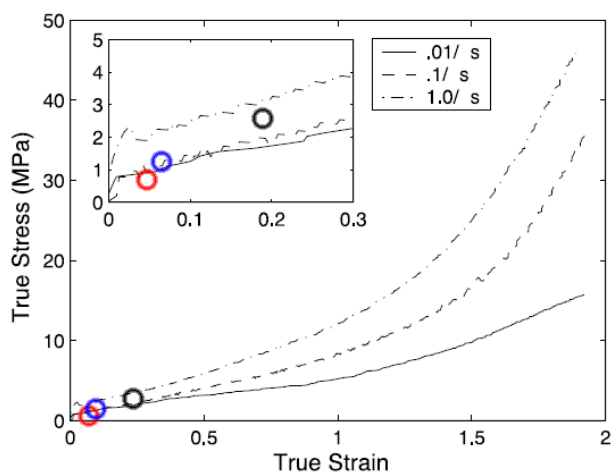


Figure 20 100[°C]

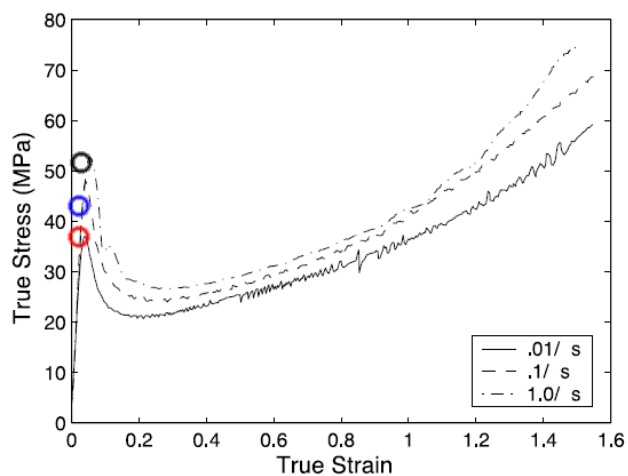


Figure 21 (参考) 60[°C]

5. 検 討

- (1) 解析条件を簡易化しており細かな検討課題は残るものの、概ね実験と一致する結果が得られた。
- (2) 60[°C]の場合は解析結果の降伏点が高めの値を取っている。参考として、図14, 15においてパラメータの近似を除いて解析した結果を図21に示す。こうした場合は実験値との整合性は向上したが、入力ファイル作成の煩雑さが増すこと、実験値自体も多少の誤差を含むことに注意を払う必要があると考えている。
- (3) 実験値と解析結果で横軸（ひずみ）のずれが見られる。これは、ヤング率に関してDMAから引用した値と、実験値に表れている値に差があるためと推定できる。特に、ガラス転移点前ではDMAのヤング率の値が実験値より高く、ガラス転移点後は逆に実験値より低くなる傾向が見られた。

6. 結 語

樹脂において、温度とひずみ速度に依存して応力-ひずみ線図のピーク高さが変化する様子を、簡易化した手法で一定程度の再現ができた。詳細なシミュレーションのためには、実質的なヤング率の値の計測、パラメータ D, n の正確な推定が必要となることが示唆された。

文 献

- (1) Dupaix, R.B., and M.C.Boyce,“Finite strain behavior of poly(ethylene terephthalate)(PET)and poly(ethylene-terephthalate)-glycol(PETG)”, *polymer*, Vol.46(2005), pp.4827-4838.
- (2) Buckley, C.P., and C.Y. Lew, “Biaxial hot-drawing of poly(ethylene terephthalate): An experimental study spanning the processing range”, *polymer*, Vol.52(2011),pp.1803-1810