

樹脂材料の常温での非線形・ひずみ速度依存性挙動について： 実験結果の考察

Non-linear, Strain Rate-dependent Behavior of Polymer at Room Temperature: Experimental Findings

前 博 行*

Hiroyuki MAE

高 橋 順 一**

Junichi TAKAHASHI

高 田 賢 治*

Kenji TAKADA

山 本 敏 治**

Toshiharu YAMAMOTO

要 旨

樹脂材料において、顕著な材料非線形性と高ひずみ速度における応力ひずみ挙動の取得の難しさから、準静的な応力ひずみ挙動に基づくシミュレーションのみがおこなわれている。

本研究では、今まで計測困難であった樹脂の高速変形時の応力ひずみ挙動を計測できる手法を構築した。これにより、従来の外挿法からでは推定困難な高ひずみ速度領域における樹脂の応力ひずみ挙動を把握することができた。さらに、実験から得られた応力ひずみ挙動を有限要素モデルに適用することにより、高ひずみ速度でのシミュレーションの再現性向上が確認された。

ABSTRACT

Due to the strong non-linearity and the difficulty of obtaining data on the behavior of polymers at high strain rates, most crash simulations use materials data based on quasi-static testing.

This study therefore attempted to obtain materials data for polymers used in the interior and exterior of automobiles at high strain rates. The material data obtained differs from data obtained through the linear interpolation of stress to model the behavior of polymers at high strain rates. The results of the tests conducted in this project have been compared with results obtained using commercial finite element models.

まえがき

近年、自動車開発において、衝突シミュレーションが車体設計に導入されるようになった。現在、自動車の主材料である鋼材における衝突シミュレーションは、構造部材の軸方向圧壊計算において計算精度向上が示されるなど、充分に実用の域に達している⁽¹⁾。この要因の一つに、高ひずみ速度における鋼材の応力ひずみ挙動が正確に把握された⁽²⁾ことが挙げられる。一方で、樹脂材料でのシミュレーションにおいては材料のより複雑な応力ひずみ挙動のため、研究事例⁽³⁾が少なかった。また、高ひずみ速度での材料データの取得においては、試験片の応力ひずみ挙動そのものの値よりも振動による計測値の乱れの方が大きくなるということが課題となっていた⁽⁴⁾。

そこで、本研究では、樹脂材料では計測困難だった高ひずみ速度における応力ひずみ挙動を計測できる手法を構築

する。また、従来の外挿法からでは推定困難な高ひずみ速度での樹脂の応力ひずみ挙動について考察を加える。最後に、得られた応力ひずみ挙動を有限要素モデルに適用したシミュレーション結果を示す。

1. 樹脂材料の機械的性質

この章では樹脂材料の機械的特性について、概要を述べる。

樹脂材料の機械的性質は粘弾性、ひずみ速度依存性、静水圧依存性、射出成型流れ方向依存性、湿度依存性の6項目があげられ、これらの特性は、樹脂材料の種類ごとに大きく異なることが知られている。衝突計算は、材料の高速変形を計算することが主な目的であり、材料の高速変形時の応力ひずみ挙動が重要なものとなる。そこで本研究では、材料の変形速度に顕著に依存する粘弾性、ひずみ速度依存性に着目する。それらの特徴を Fig. 1 に模式的に示す。

* 栃木研究所

** 旭化成株式会社

本論文では、樹脂材料を衝突シミュレーションへ適用することを考え、各樹脂材料の粘弾性とひずみ速度依存性の測定試験をおこない、樹脂材料の高速変形について考察をおこなう。加えて、有限要素法による計算結果との比較を示す。

2. 引張・曲げ試験について

この章では、本研究でおこなった引張と曲げ試験についての概要を述べる。

今日、高ひずみ速度における材料特性を測定するための試験装置は様々存在するが、各ひずみ速度域で適した試験手法が提案されている⁽⁵⁾。それによると、ひずみ速度 10^3 sec^{-1} から 10^5 sec^{-1} ではスプリット・ホプキンソン・バー法⁽⁶⁾やワン・バー法⁽⁷⁾が適しており、ひずみ速度 10^0 sec^{-1} から 10^3 sec^{-1} では油圧サーボシステムなどが適するとされている。本研究では、試験片形状違いによる影響を考慮し、低速引張から高速引張まで可能な限り、同一の試験片形状で試験をおこなうという目的で、油圧サーボシステムを採用した。これら高ひずみ速度域の試験手法は、大きな質量を加速させ、測定試験片に荷重が負荷される前に、移動部材に衝突させて、チャック部の移動を開始させるものである。したがって、高いひずみ速度ほど荷重計測時間が短くなり、ロードセル中の弾性変形が均一化するのに必要な時間にほぼ等しくなるために、ロードセル中を多重反射した弾性波がノイズとして計測値に大きく影響を与えるという現象が発生し、この解決が計測上の課題であった。

そこで、本研究における高速引張試験においては、チャックとロードセルを小型軽量化することで、測定部の固有振動数を従来の 3.4 倍に高くし、衝撃入力による振動発生を抑えることで、高速側のデータ取得を狙った。

2.1. 引張試験装置及び試験手法

本研究では、静的から準静的(ひずみ速度 10^{-4} sec^{-1} - 10^{-1} sec^{-1})での機械的特性取得のために万能試験機 Type AG (AGS-1000G: 最大引張速度 $1.7 \times 10^2 \text{ m/sec}$)を用い、中高速変形時の機械特性取得のために油圧サーボ式高速衝撃試

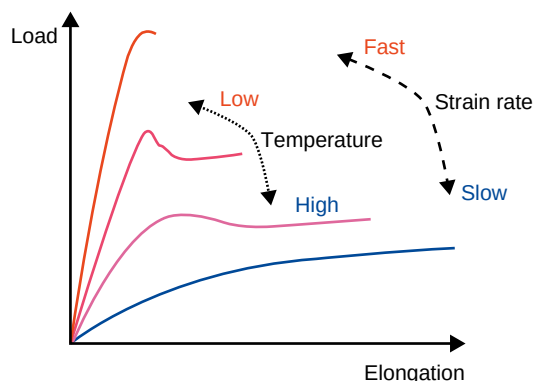


Fig. 1 Dependence of strain rate and temperature in material data

験機 Type A (EHF-U2H-20L: 最大引張速度 $1.5 \times 10^4 \text{ m/sec}$)と Type B (HITS-T10: 最大引張速度 $2.0 \times 10^4 \text{ m/sec}$)を用いた。ここで、Type A, Type B はともに作動原理は同じであるが、Type A では、ロードセルを含む試験機の固有振動数が十分に高くないために、ひずみ速度が 10^2 sec^{-1} で衝撃によるノイズが顕著になってしまい、正確なデータ取得が困難になる問題があった。一方、Type B は Type A よりも軽量かつ高剛性のロードセルを用いている点が異なる。これら高速衝撃試験機作動原理を Fig. 2 に示す。

この試験機は、試験片上部に設置したピストンの助走距離(80mm)の間で、油圧シリンダを所定の速度まで加速した後、引張試験をおこなうものであり、本実験では、ひずみ速度 10^0 sec^{-1} - 10^2 sec^{-1} の範囲で樹脂材料の応力ひずみ挙動測定に使用した。高速衝撃試験装置の写真を Fig. 3 に示す。

なお、引張試験中は、樹脂材料試験片の断面形状変化を測定するために、低速引張時は、ホームビデオカメラ (SONY 製)を用い、中高速引張時は毎秒 20 000 コマ記録可能な高速ビデオカメラ (NAC 製)を用いることで、試験片の断面形状変化を随時記録した。

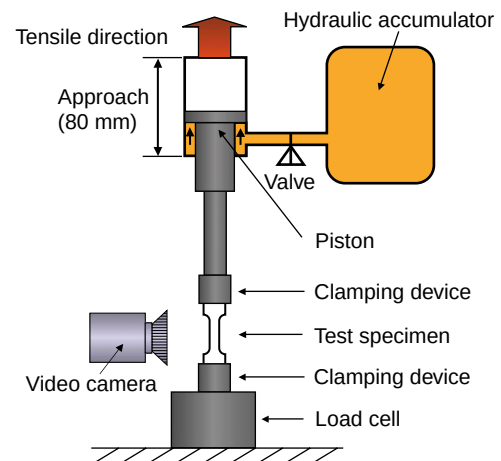


Fig. 2 Schematic illustration of tensile testing apparatus

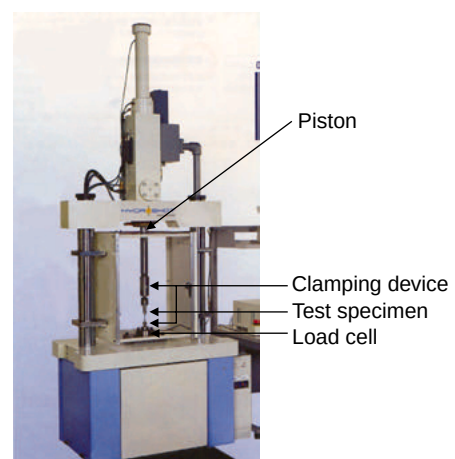


Fig. 3 High-speed tensile testing apparatus

3.2. 引張試験片の材料及び形状

今回使用する試験片材料は、自動車の内・外装部品に広く使用されている樹脂材料の中から、熱可塑性結晶性材料であるポリプロピレン、熱可塑性非晶材料であるポリカーボネート、熱硬化樹脂材料であるエポキシの3種類を選択し、樹脂材料の分類別による比較検討をおこなった。

試験片形状については、静的引張から中速引張（ひずみ速度 10^1 sec^{-1} ）の範囲で、JISK7113 の2号ダンベル型（平行部幅6 mm）試験片を使用し、高速引張（ひずみ速度 10^2 sec^{-1} ）のみ、試験機専用の小型試験片を用いた。それぞれの試験片形状は Fig. 4 と Fig. 5 に示される。

本試験では、形状の異なる2種類の試験片を用いたため、2種類のチャックを使用した。Fig. 6はチャックAの写真であり、Fig. 7はチャックBの写真である。チャックAとチャックBの材料はチタンである。チャックBはチャックAと比べ小型で軽量に設計されており、Type A で 5.0 kHz の固有振動数であったが、Type B の固有振動数は 17 kHz に高められている。

3.3. 曲げ試験装置及び試験手法

低速引張試験と同様の試験機を用いて、曲げ試験をおこなった。Fig. 8 に曲げ試験の模式図を示し、Fig. 9 に曲げ試験装置の写真を示す。支点間距離は40 mmとし、ひずみ速度 $10^{-4} - 10^2 \text{ sec}^{-1}$ で加圧くさびを移動させることで試験した。加圧くさびと接触する試験片裏面にひずみゲージを貼付け、測定可能な最大ひずみ 2.0×10^2 に達するまでの間、測定をおこなった。

3.4. 曲げ試験片の材料および形状

本曲げ試験においては、熱可塑性結晶性材料のポリプロピレンのみを使用し、試験片形状は $100 \times 10 \times 3 \text{ mm}$ の長方形板形状とした。

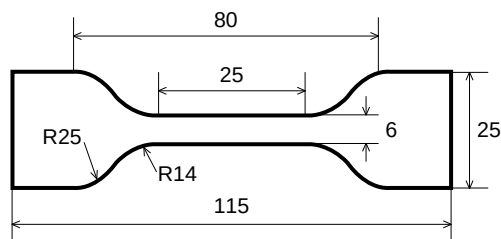


Fig. 4 Schematic illustration of tensile test specimen

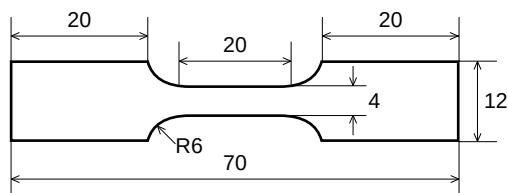


Fig. 5 Schematic illustration of high-speed tensile test specimen



Fig. 6 Clamping device A



Fig. 7 Clamping device B

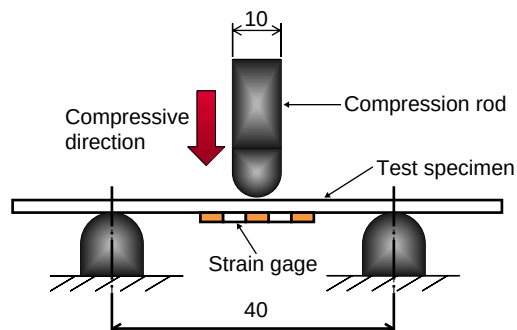


Fig. 8 Schematic illustration of bending test



Fig. 9 Bending test apparatus

Table 1 Tensile test conditions

Crosshead velocity	Strain rate	Testing apparatus
8×10^{-6} m/s	10^{-4}	Type AG: AGS-1000G JIS2 test specimen
8×10^{-5} m/s	10^{-3}	
8×10^{-4} m/s	10^{-2}	
8×10^{-3} m/s	10^{-1}	
8×10^{-2} m/s	10^0	Type A: EHF-U2H-20L JIS2 test specimen
8×10^{-1} m/s	10^1	
4×10^0 m/s	10^2	Type B: HITS-T10 Special test specimen

4. 試験結果及び考察

この章では、まず、準静的、中、高ひずみ速度で、引張試験機の使い分けをおこなったことから、同じひずみ速度において、各試験機における測定値の比較をおこなう。次に、樹脂材料3種類の引張試験と樹脂材料1種類の曲げ試験における結果として、各ひずみ速度ごとの真応力・真ひずみ線図を示し、最後に、本引張試験について、汎用陽解法有限要素法ソルバによる計算をおこない、実測値との比較をおこなう。

4.1. 試験機違いによる結果の差異について

本実験では、試験機の性能や前述した高速側での振動除去のため、Table 1に示すように、ひずみ速度に応じて引張

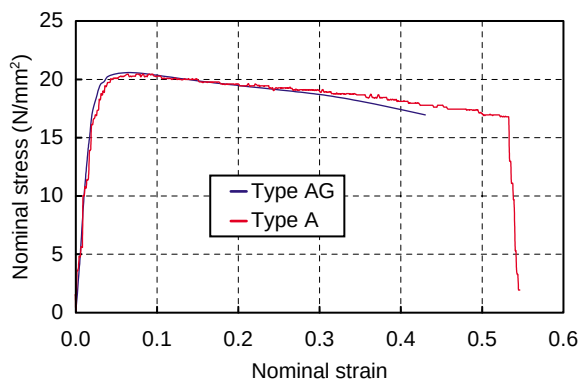


Fig. 10 Stress-strain curves of type AG and A

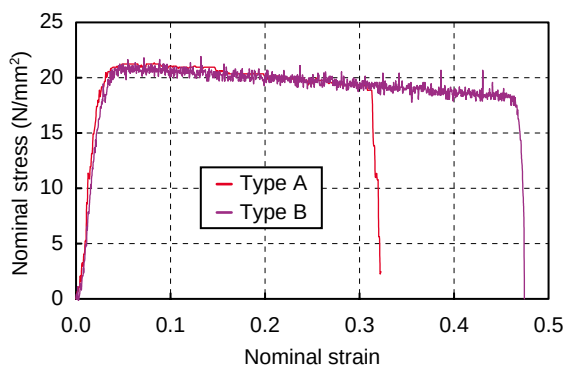


Fig. 11 Stress-strain curves of type A and B

試験機の使い分けをおこなった。

まず、万能試験機(Type AG)と高速衝撃試験機(Type A)との差異検証のため、ポリプロピレンにおいて、ひずみ速度 10^1 sec^{-1} で引張試験をおこなった。Fig. 10 はその際の応力ひずみ線図であり、弾性率と応力値の一致を確認した。

次に、2種類の高速衝撃試験機(Type A, B)の差異検証のため、ポリプロピレンにおいてひずみ速度 10^0 sec^{-1} の引張試験結果を比較した。その結果が Fig. 11 に示されており、Fig. 10 と同様に、弾性率・応力値の一致を確認した。

4.2. 引張試験結果について

本研究では、熱可塑性結晶性樹脂のポリプロピレン、熱可塑性非晶性樹脂のポリカーボネート、熱硬化性樹脂のエポキシの3種類について、Table 1に示されている試験機で準静的から高速域までの引張試験データを取得した。

Fig. 12は、ポリプロピレンの真応力・真ひずみ線図である。

図からもわかるように、引張速度によって弾性率が上昇している粘弾性効果がみられ、破断ひずみもひずみ速度の上昇と共に小さくなる傾向が観察された。

ひずみ速度 10^2 sec^{-1} のデータについて、Fig. 13 に高速衝撃試験機違いによる取得データの違いを示す。

高速衝撃試験機(Type A)の取得データにおいては、前述した様に、衝撃入力によるノイズが試験片を伝わり、弾性率や応力値の正確な取得が困難となっている。一方で、高速衝

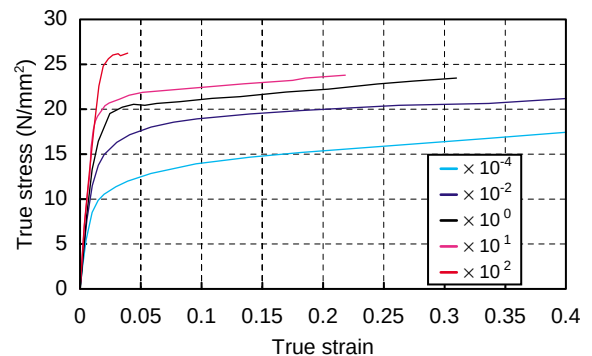
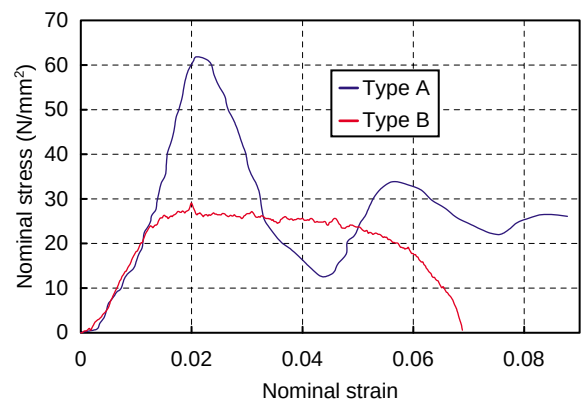


Fig. 12 Stress-strain curves of polypropylene at various strain rates

Fig. 13 Stress-strain curves of polypropylene at strain rate 100 sec^{-1}

撃試験機(Type B)による取得データにおいては、衝撃入力によるノイズのない応力・ひずみ線図を取得することができた。

次に、得られたひずみ速度 10^2 sec^{-1} の応力値についての考察をおこなう。一般に、衝突シミュレーションなどで高速変形を扱う場合、低速・中速域で取得された構成材料の応力ひずみ曲線に基づいて、高速変形時の材料特性を外挿計算によって補間する手法や、低速域のみひずみ速度依存の降伏応力とし、中速・高速域では降伏応力を一定に保つ方法がある。高速域の外挿計算値と本研究で得られた応力増加値との比較をおこなってみると、本研究で得られたひずみ速度 10^1 から 10^2 sec^{-1} への応力増加値は、ひずみ速度 10^0 から 10^1 sec^{-1} への応力増加値に基づく計算値よりも、はるかに大きな値を示した。

ひずみ速度 10^2 sec^{-1} の応力値について、ポリプロピレンの衝撃エネルギー吸収量と温度の関係から考察する。樹脂材料の機械的性質としては、高ひずみ速度における引張応力ひずみ線図と、低温での引張応力ひずみ線図とは同じ応力増加傾向を示すことが知られている⁽⁸⁾。Fig. 14はポリプロピレンの衝撃エネルギー吸収量と温度の関係図であり、温度低下に伴い、衝撃エネルギー吸収量の急激な低下が観察されている⁽⁹⁾。この衝撃エネルギー吸収量を引張応力ひずみ線図でのエネルギー量に置き換えてみると、ひずみ速度 10^2 sec^{-1} で突然エネルギー量が低減することは、温度低

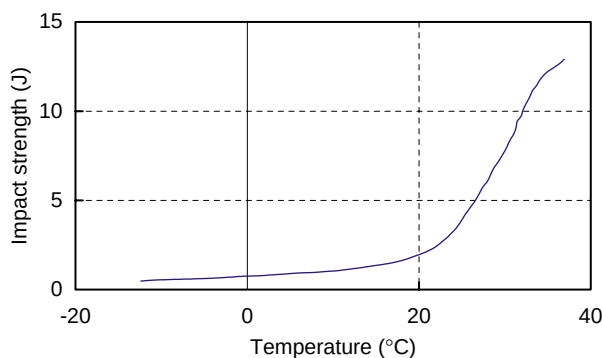


Fig. 14 Temperature dependence at absorption of impact energy in polypropylene

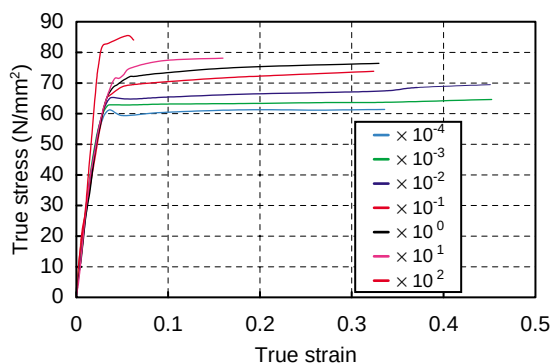


Fig. 15 Stress-strain curves of polycarbonate at various strain rates

下におけるエネルギー吸収量低減と類似していると推定される。以上の考察から、本実験で、ポリプロピレンにおいては、ひずみ速度 10^1 sec^{-1} から 10^2 sec^{-1} の間で、上述したエネルギー吸収量の急激な変化が存在する可能性が考えられるが、今後さらなる検討を進めていく。また、その際に、ひずみ速度での境界値の把握は、より多くのひずみ速度水準にて引張試験をおこなうことが必要であろう。

次に、熱可塑性非晶樹脂のポリカーボネートにおける真応力・真ひずみ曲線を Fig. 15 に示す。この試験データも同様に、粘弾性、ひずみ速度依存性が顕著に表れた。また、ポリカーボネートでは、ポリプロピレンとは異なり、破断ひずみにばらつきが見られた。この試験後の試験片全体写真を Fig. 16 に示し、試験片表面に発生したクレーズ変形の写真を Fig. 17, 18 に示す。

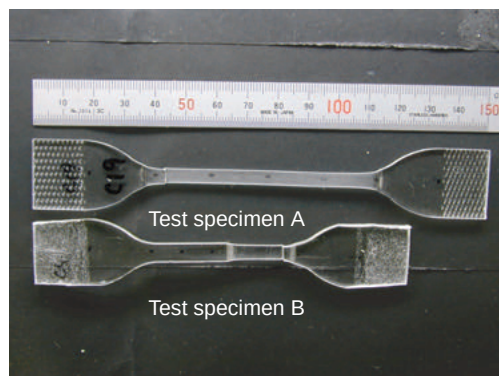


Fig. 16 Photograph of test specimens

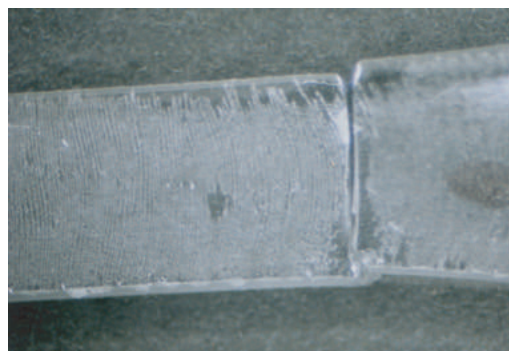


Fig. 17 Magnified photograph of test specimen A



Fig. 18 Magnified photograph of test specimen B

Fig. 16 において、試験片Aはひずみ速度 10^3 sec^{-1} の試験片で、試験片Bはひずみ速度 10^1 sec^{-1} の試験片である。図からも明らかであるように、試験片Aの平行部が、全域に渡りネッキング(くびれ)を起こしている。一方で、試験片Bでは、ネッキングは局所的にのみ現れている。これらのネッキングの発生形態はひずみ速度 10^2 sec^{-1} 以下の領域では、試験片Aと同様に現れ、ひずみ速度 10^1 sec^{-1} を超える領域では、試験片Bと同様のネッキングが観察された。

また、Fig. 17において、試験片Aの表面には高密度にクレーズ変形が観察されたが、Fig. 18の試験片B表面にはクレーズが所々に発生した。各試験片表面に1.0 cm 間隔で付した印を参照して、ネッキング部の局所的な破断ひずみを測定した。その結果、ひずみ速度 10^1 sec^{-1} を超える領域では、ひずみ速度が大きいほど破断ひずみが小さい傾向が認められたが、ひずみ速度 10^2 sec^{-1} 以下の領域では、局所的な破断ひずみとひずみ速度との明瞭な相関は観察されなかった。これらの観察結果から、高密度にクレーズが発生する臨界ひずみ速度が存在し、この速度以下の速度域においては、ひずみ速度と破断ひずみの相関が現れ難いということが推測されるが、今後さらなる検証を進めていく。また、ポリカーボネートにおいて、低ひずみ速度領域では、ポリプロピレンと異なり、破断ひずみが小さかった。この破断ひずみの違いは、結晶性か非晶性かに大きく依存することが知られている。結晶性樹脂の場合、物質内の高分子鎖の配向が荷重負荷方向を向き、破断までのひずみ量を大きくしている。しかしながら、非晶性樹脂では、無定形分子がランダムに配置された構造をなしており、結晶組織を有していないために、結晶性樹脂よりも小さいひずみで破断したと考えられる。

最後に、熱硬化樹脂であるエポキシの真応力真ひずみ線図を Fig. 19 に示す。この結果からもポリプロピレンとポリカーボネート同様に、ひずみ速度依存の弾性率変化が観察された。一方で、破断は弾性域内で起きたのが大部分であった。

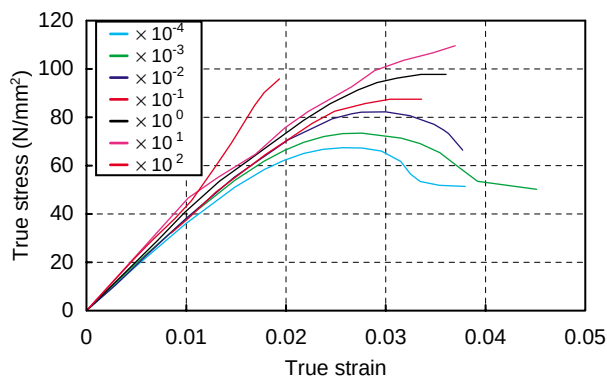


Fig. 19 Stress-strain curves of epoxy at various strain rates

4.3. 曲げ試験結果

本研究では、引張試験に加えて熱可塑性樹脂のポリプロピレンにおいて、曲げ試験をおこなった。ひずみ速度 10^4 , 10^3 , 10^2 sec^{-1} の3試験水準において、ひずみゲージを用いた曲げ試験をおこない、曲げ応力ひずみ線図を Fig. 20 に示す。曲げ試験についても粘弾性効果が観察され、ひずみ速度上昇に伴い、曲げ弾性率も大きくなることが観察された。

4.4. 有限要素モデルへの適用

ポリプロピレンにおいて、ひずみ速度 10^2 sec^{-1} の本引張試験のシミュレーションによる検証を、汎用陽解法有限要素法ソルバにておこなった。計算条件は、ひずみ速度 10^2 sec^{-1} を含む応力ひずみ挙動に基づいた場合(Case A)とひずみ速度 10^1 sec^{-1} を超える速度域の応力ひずみ挙動を外挿により求めた場合(Case B)の2条件とし、引張試験時の最大荷重値との比較をおこなった。最大荷重値はCase Aで460(N), Case Bで347(N), 実測値で445(N)であった。Fig. 21, Fig. 22 は引張変位2 mm 時の Von Mises 応力分布を伴う試験片の変形図であり、応力値の高い領域は赤色、低い領域は青色で表示されている。

Fig. 21, 22 から明らかなように、Case A の計算結果は、Case Bの結果よりも応力値が高くなっている。これは、Case B において、ひずみ速度 10^0 sec^{-1} と 10^1 sec^{-1} の実験データから線形補間された応力値が、実験値に比べて小さいためである。以上の結果から、高ひずみ速度の試験データを用いることで、外装法による計算結果と比較し、高ひずみ速度領域のシミュレーション再現性向上が確認された。

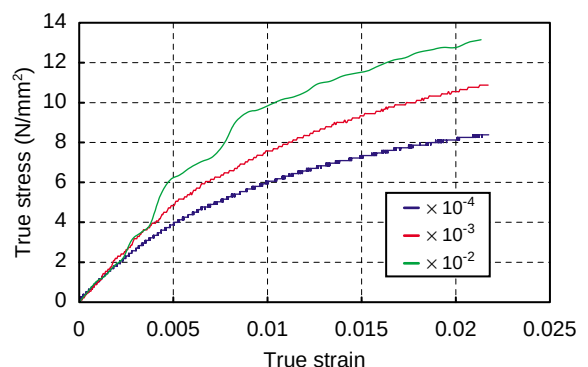


Fig. 20 Stress-strain curves of polypropylene at various strain rates



Fig. 21 Deformation of tensile test piece (Case A)



Fig. 22 Deformation of tensile test piece (Case B)

5. まとめ

自動車内・外装部品に用いられる樹脂材料について、引張試験・曲げ試験をおこない、樹脂材料の非線形性・ひずみ速度依存性、破断に関して考察した。さらに汎用有限要素法ソルバにより引張試験のシミュレーションをおこなった。今後の展開としては、本樹脂試験の破断界面解析と樹脂材料の新たな定式化を進めていく。

以下に、本研究を通じて得られた結論を示す。

- (1) 今まで計測困難であった樹脂の高速変形の方法挙動を計測できる手法を構築した。
- (2) 従来の外挿法からでは推定困難な高ひずみ速度領域における樹脂の応力ひずみ挙動を把握した。
- (3) 実験から得られた応力ひずみ挙動を有限要素モデルに適用することにより、高ひずみ速度でのシミュレーションの再現性向上が確認された。

参考文献

- (1) 向井陽一ほか：高強度鋼板の衝突特性と評価方法，神戸製鋼技報，Vol.52, No.3, p.32-34(2002)
- (2) 谷村眞治：日本機械学会第2回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集，p.17(1994)
- (3) 藤井昌浩ほか：リブ構造を持つ樹脂部品に対する衝突解析技術の研究，自動車技術会春季学術講演会前刷集(2000)
- (4) Keuerleber, M., Eyerer, P.: High-speed tensile testing of polymers - and its application to an instrument panel-, Roell Amsler Symposium(2002)
- (5) Mayers, M.: Dynamic Behavior of Materials, John Wiley & Sons Inc.(1994)
- (6) Hopkinson, B.: Collected Scientific Papers, Cambridge University Press(1921)
- (7) Kawata, K., et al.: Mechanical properties at high rates of strain, Conference series, Institute of physics(1979)
- (8) 社団法人日本塑性加工学会：最新塑性加工便覧，東京，コロナ社，p.278(1986)
- (9) 宮坂啓象：プラスチック事典，東京，朝倉書店，p.356(1992)

■ 著 者 ■



前 博行



高田 賢治



高橋 順一



山本 敏治