

# 可変速式3点曲げ衝撃試験装置の開発 (第4報：引張破壊試験に向けた改良と比較試験)

内田 武\*・高野 竜之介\*\*

Development of Speed-variable-type Three-point-bending Impact Testing Apparatus  
(Part 4 : Improvements for the Tensile Fracture Test and Comparative Testing)  
Takeshi UCHIDA\* and Ryunosuke TAKANO\*\*

## Abstract

The object of this study is to develop a compact testing apparatus which can perform the three-point bending tests under the wide displacement rate range, and to put it to practical use. For the fourth grade of development, by using the improved Speed-variable-type Three-point-bending Impact Testing Apparatus, effect of loading rate on fracture strength and fracture behavior of plastic materials (PC, PMMA) was investigated. In this investigation, in order to check the equality of a variable-speed impact test equipment and universal tester, loading rates was set as 3-300 mm/min. In addition, The tensile test is conducted, it was possible to confirm the equivalence of the results of the universal testing machine.

*Keywords : Three point bending, Impact testing apparatus, PC, PMMA, Fracture strength, Fracture behavior*

## 1. 緒言

現在、プラスチック材料は日常生活の様々なところで使用されているが、耐久性を保証しなければならない構造部材に使用されることは少なかった。しかし、最近では航空機や自動車などの輸送機の構造部材へ採用され始め、金属材料と同様に、耐久性を含めた機械的強度を評価する必要性が生じている。材料の衝撃特性を調べるために、今日では様々な試験が行われており、試験負荷速度によって主に静的試験、準衝撃試験および衝撃試験に分けられる。それぞれの試験負荷速度は、次の通りである。

まず、静的試験の際に用いられる「ねじ式試験機」の試験負荷速度領域は、0.0001～1000mm/min ( $1.67 \times 10^{-9}$  ～  $1.67 \times 10^{-2}$  m/s) で、超微速度領域から低速度領域までの試験が可能である。

また、静的試験から準衝撃試験の際に用いられる一般の「油圧サーボ式試験機」の試験負荷速度領域は0.1～10000mm/min ( $1.67 \times 10^{-6}$  ～0.167m/s) と微速度領域から中速度領域であり、改良された油圧サーボ試験機では、衝撃試験の範囲の速度1000000mm/min (16.7m/s) までの試験を行うことができる。

衝撃試験機については、主にシャルピー衝撃試験機やホプキンソン棒式衝撃試験機などが挙げられる。シャルピー試験においては性能的に試験負荷速度0.1～5.5m/sまでの試験が可能ではあるが、一般的にはプラスチック材料では3.0m/s、金属材料では5.0m/sが用いられる。ホプキンソン棒式衝撃試験機では、約10m/s前後の衝撃試験が可能である。図1に、各種材料試験機の稼働速度を示している。

これらの衝撃試験機は、稼働できる試験負荷速度領域が非常に狭く、1台で幅広い衝撃速度による実験を行うことは難しい。低速度から高速度にわたって材料試験を行いたい場合は、一般的には目的の速度域に対応する試験機を選択しなければならない、また複数台の試験機を準備しなければならないため、コストや設置面積などが膨大になることが予想される。

そこで、従来から使用されている各種材料試験機の特徴を踏まえた上で、コンパクトかつ簡易な構造で、他の試験機と比べて安価な可変速式の衝撃試験装置の開発に取り組んでいる。その可変速式衝撃試験装置を用いて、準衝撃速度領域でのプラスチック材料の引張試験を行い、引張強度および変形挙動に及ぼす変位速度の影響を調査することが、本研究の目的である。

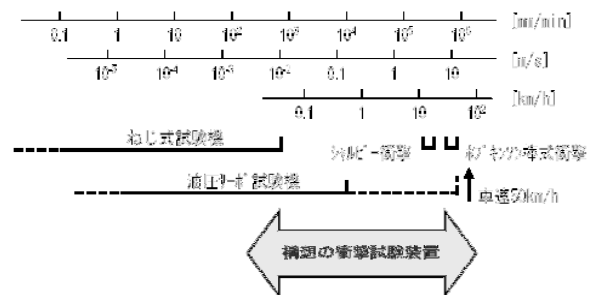


図1 各種材料試験機の稼働速度

\* 機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

\*\* 専攻科, 生産工学専攻2年

(Advanced Production Engineering Course, 2nd grade)

## 2. 可変速式衝撃試験装置の構成

### 2.1 可変速式衝撃試験装置の仕組み

図2に示しているのは、本研究に使用する可変速式試験装置の外観である。

本試験装置の動力は、図中Aに示すインバータ駆動専用ACモータ（富士電機製MVA8107A、2.2kW）で、図中Bのベクトル制御式インバータ（MSテクノ製VEA-22,MITY SERVO、200V）に所定の周波数を入力することにより、自由にモータの回転を制御できる。モータの回転は図中Cのプーリーを通じて16分の1（1/4の2段）に減速されてから主軸に伝達する。主軸と円盤は通常フリーの状態であるが、クラッチをつなぐことにより、図中Dの円盤を回転させ、円盤先端に取り付けてある打撃刃を時計周りに回転させ、図中Eの治具に衝突し試験片を衝撃的に破壊する。図中Fに主軸の回転状況を確認するためのロータリーエンコーダ（オムロン製E6C3-CWZ3EH、分解能3600pulse/rev、応答周波数125kHz、電圧出力）を取付け、打撃刃の変位を計測する。荷重信号は、図中Gに示しているロードセル（共和電業製LUR-A-3KNSA1、定格容量±2kN、固有振動数約20kHz）を用いて計測する。

### 2.2 試験装置計測系の処理方法

ロードセルが検出した荷重信号とロータリーエンコーダが検出した角度信号をパソコンに取り込むことで、画面上に図3のような波形が表示される。縦軸は電圧、横軸はデータ数を示している。データ取得後、Excel上で縦軸を荷重に、横軸を経過時間へと変換する。

図中の青色波形がロードセルで検出した荷重信号を示している。次に、赤色波形がロータリーエンコーダで検出した角度信号を示している。山の始まりから次の山の始まりまでが、パルスとなっている。さらに、このロータリーエンコーダの分解能は3600P/revで、主軸が1回転する内に3600回パルス信号を発生させるので、

$$\frac{360[\text{deg}/\text{rev}]}{3600[\text{P}/\text{rev}]} = 0.1[\text{deg}/\text{P}] \quad (1)$$

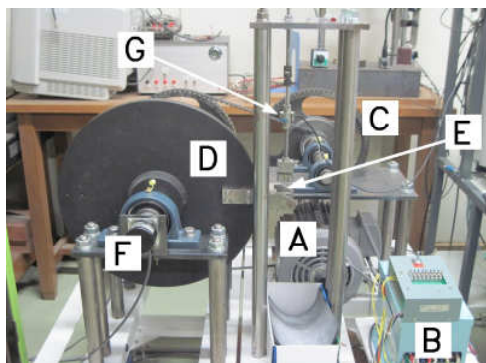


図2 試験装置外観

となり、 $0.1^\circ$ 回転する度に、1パルスの信号を発生することが分かる。

そして、主軸中心から試験片中央部まで距離は250mmに設計しているため、円周は $2\pi r = 2\pi \times 250 = 500\text{mm}$ で、これを分解能の3600P/revで除すると、

$$\frac{500\pi}{3600} = 0.43633[\text{mm}] \quad (2)$$

となり、1パルスで円周方向に打撃刃は0.43633mmの変位があることが確認できる。

### 2.3 荷重の変換方法

ロードセルから検出されたひずみ信号を荷重値に変換する際の変換方法を述べる。本研究の可変速式試験装置を用いた試験では、ロードセルおよび動ひずみ計を用いて、試験片を破断させる際の荷重を算出する。

ロードセルとは、ある荷重による入力に対して一定のひずみを出力するものである。これらのことを考慮に入れ、動ひずみ計から出力される電圧値より、その際にロードセルにかかっている荷重を算出する方法を下記に示す。まず、動ひずみ計からひずみを $\varepsilon = 65 \times 10^{-6}$ に対して電圧出力 $V = 1.0\text{V}$ になるように設定していることから、ひずみと電圧出力との関係は、

$$\begin{aligned} \varepsilon : V &= 65 \times 10^{-6} : 1.0 \\ \therefore \varepsilon &= 65 \times 10^{-6} V \end{aligned} \quad (3)$$

となる。

次に、使用したロードセルは、荷重 $F = 1.054[\text{N}]$ に対して、ひずみ $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-6}$ を発生させることから、荷重とひずみの関係式は、

$$\begin{aligned} F : \varepsilon &= 1.054 : 1.0 \times 10^{-6} \\ \therefore F &= 1.054 \times 10^6 \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

2つの関係式より、求める出力電圧と荷重の関係式は、

$$F = 1.054 \times 10^6 \times 65 \times 10^{-6} V = 68.51V \quad (5)$$

となる。

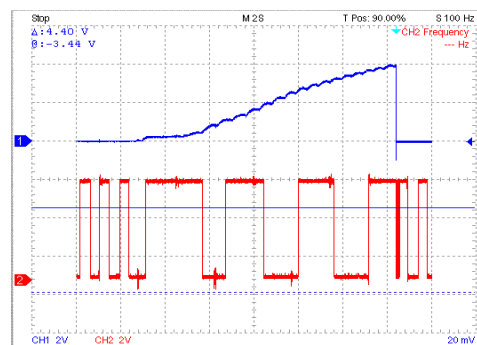


図3 ロードセルとロータリーエンコーダの電圧信号のデータ波形

2. 4 可変速式衝撃試験装置の試験手順

本試験装置を使用して実際に試験を行う際には、以下のような手順に沿って試験が行われる。

- ①インバータに接続してあるコントローラのD0スイッチをONにし、モータに通電する。
- ②打撃刃を所定の位置にセットし、クラッチをつなぎ固定する。
- ③Dso.exeファイルを開き、パソコン画面上でオシロスコープのサンプリング周期を設定する。
- ④コントローラのD4スイッチをONにしてから、D1スイッチをONにすることで、打撃刃を時計方向に回転させる。
- ⑤打撃刃が試験片に到達する前に、オシロスコープを作動する。
- ⑥試験片が破断したら、オシロスコープ計測を終了する。
- ⑦計測終了後は、Export Data Selectをクリックし、CSV形式でデータを保存する。

さらに、計測系で計測された荷重および角度変化信号をパソコンにCSV形式で保存した後の処理は、以下の通りである。

- ①実験データのファイルを開く。
- ②このとき、表示されているデータは $10^7$ に増幅されているので、各データを $10^7$ で割る。
- ③Excelデータを用いて、経過時間・荷重・角度変化などを計算する。

表1 PC・PMMAの機械的性質

	PC	PMMA
縦弾性係数 [GPa]	1.5	3.2
引張強さ [MPa]	54.9	68~70
耐力 [MPa]	65.1	41.0
曲げ強さ [MPa]	95	90~100
伸び [%]	87.9	5.0
比重	1.20	1.19

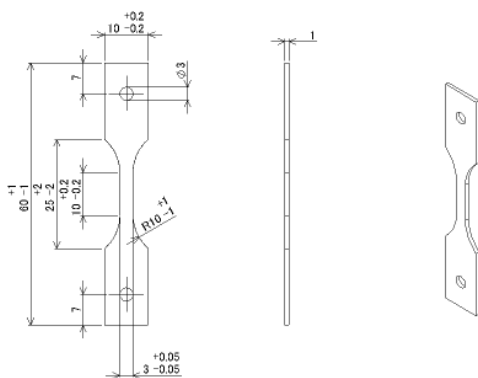


図4 引張用試験片の形状・寸法

3. 引張試験用試験片・治具・打撃刃

3. 1 試験片

本研究に使用する試験片材料は、PC(ポリカーボネート)とPMMA(アクリル樹脂)の2種類の熱可塑性プラスチック材料である。PCは汎用性エンブレ、PMMAは汎用性プラスチックにおいて代表される材料である。プラスチックの中でも最高の透明度を持ち、全光線透過率は透明PCが89%、透明PMMAが93%を誇り、無機ガラスの89%と同等あるいはそれ以上の透過率を有する。

この材料を使用した理由としては、PMMAやPCは複合材料の基材としてよく用いられ、それらの利用価値が高いことなどから、その基本的性質を把握することで今後の研究展開に活かすことができることが挙げられる。表1に、機械的性質を示す。

図4に、引張試験用試験片の形状・寸法を示す。試験片は、JIS規格を採用している。PCは延性的な材料であり、降伏後にくびれが発生し平行部が大きく伸びていくため、大変形に対して湾曲部の影響が少なく、平行部の長さを10mmとしている。

熱風循環式定温恒温器 (ISUZU製) を用いて、試験片は全て加工時の発熱による影響と残留応力の除去、クレイブの回復を目的に、図5に示した熱処理工程に従って、所定の温度および時間を考慮した昇温・保持・徐冷による熱処理を施した。熱処理最高温度は、PMMAについてはガラ

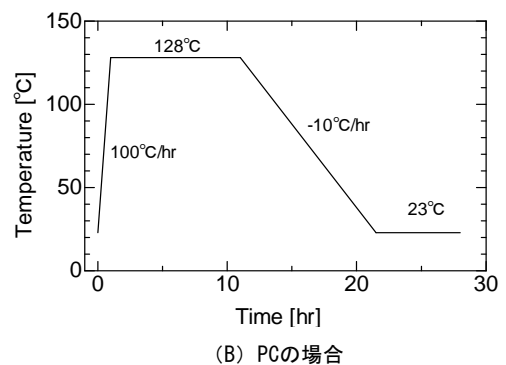
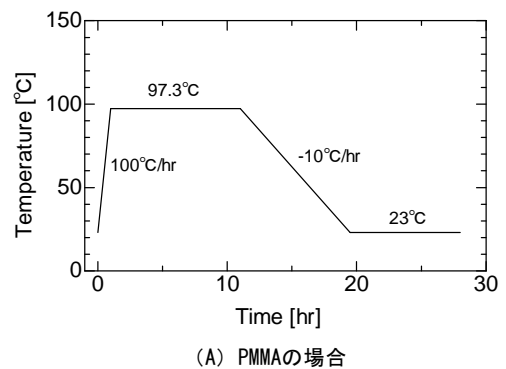


図5 試験片の熱処理工程

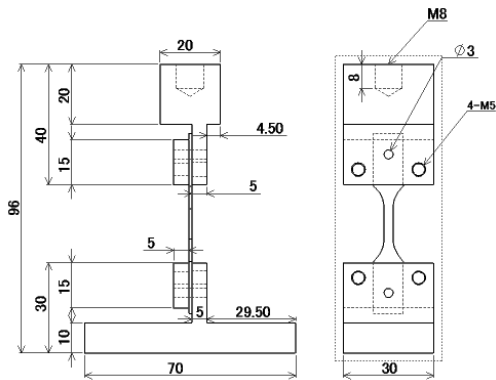


図6 試験片を取付けた状態での治具

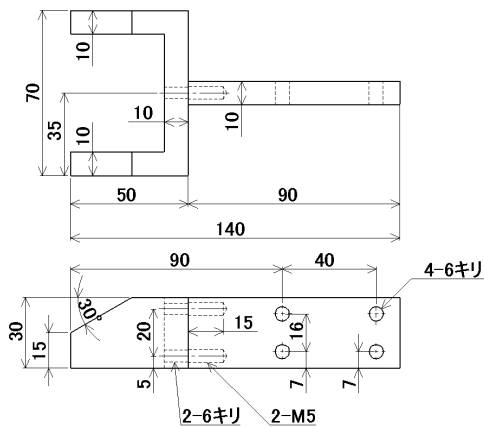


図7 打撃刃

ス転移温度(約363K)の102%温度(370.3K、97.3℃)、PCについてはガラス転移温度が130℃(約430K)であることを考慮して、その98%の128℃(401K)とした。

3. 2 引張試験用治具・打撃刃

図6に試験片を取付けた状態での治具、図7に打撃刃の形状・寸法を示す。治具は上からぶら下がっており、試験片の上下をボルトで締めて挟むことで固定する。

4. 試験結果および考察

精密万能試験機(株)島津製作所製オートグラフAGS1000A)と比較試験をするため、試験条件は各試験機で共通に試験できる変位速度の3、30、300mm/minの3速度に設定した。図8に比較試験により得られた各試験機での引張強度と変位速度の関係を示す。これによると、本試験機の結果は万能試験機の結果より若干大きくなっているが、両者の差はそれ程大きくなく、本試験機と万能試験機での結果との同等性を確認することができた。また、両材料とも、変位速度が大きくなるにつれて引張強度が上昇するとい

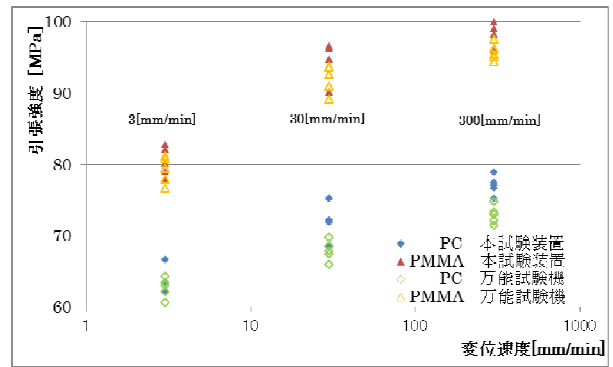
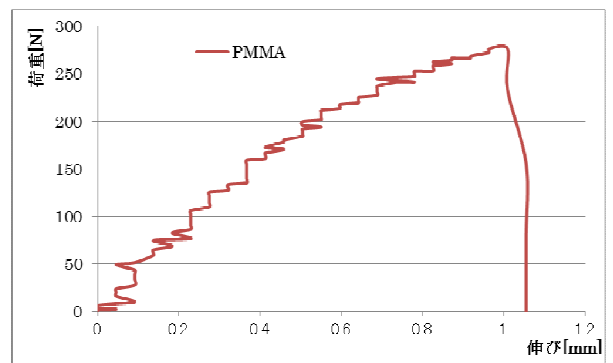
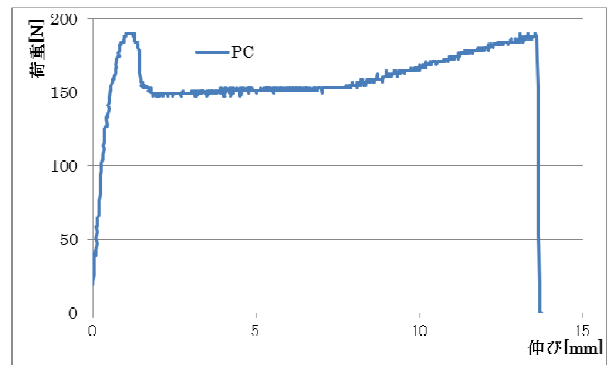


図8 引張強度—変位速度



(a) PMMA



(b) PC

図9 荷重—伸び線図(30mm/minの場合)

うことは共通的な特徴である。一方、同じ変位速度においては、PMMAの引張強度がPCより大きくなっている。

試験片を時間的に一定な割合で引き伸ばし、伸びとその伸びを試験片に引き起こすために必要な荷重を試験片が破断するまで連続的に測定し、記録することにより図9の結果が得られた。代表の変位速度として30mm/minにおける荷重と伸びの関係で、図(a)はPMMAの結果、図(b)はPCの結果を示す。

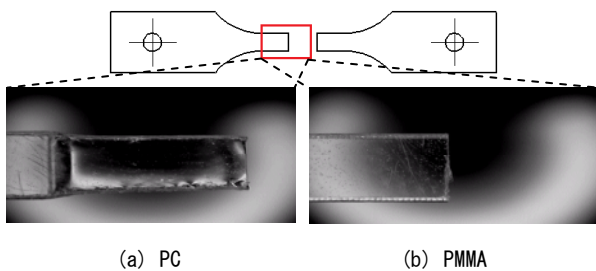
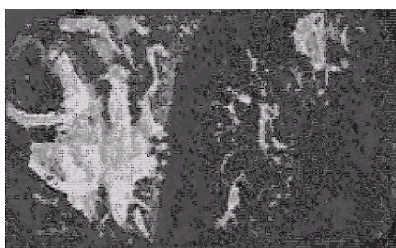
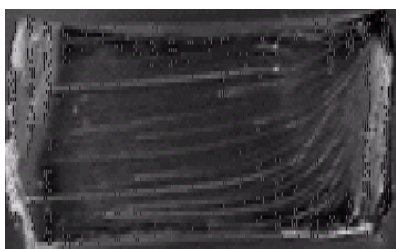


図10 試験片の破断形状



(a) PMMA



(b) PC

図11 試験片の破断面

PMMAは最大荷重に達した直後に破断しており、脆いプラスチックであると確認できる。一方、PCは、最大荷重を越えたのちに、ほぼ一定荷重の下で伸びがする冷延伸の過程がある。耐荷重はPMMAの方が少し大きい程度であるが、伸びはPCの方が10倍程度大きいことから、PCは破壊までの吸収エネルギーが大きく、このことから、PCはPMMAよりも耐衝撃性に優れていることが確認できる。

本試験機では、主軸の回転状況を確認するためのロータリーエンコーダを使用して変位を算出しているが、主軸と円盤先端に取付けてある打撃刃には距離があり、円盤の0.1°回転に対して、打撃位置における変位量は円周方向に(打撃地点からはほぼ真下方向に)0.43633mmとなっている。現時点では円盤の回転角0.1°以内の角度評価ができないので、それにより、変位量の測定評価に誤差が生じてしまい、荷重-伸び線図がうまくプロットできず、蛇行状になった。今後、より正確な変位を算出するために、新たな変位の算出方法の検討が必要である。

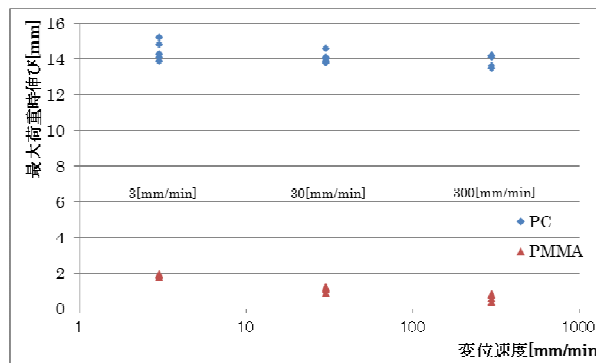


図12 伸び-変位速度

PCは降伏によりくびれが発生し、くびれ部分の伸張が試験片の平行部を亘りきってから(伸び約14mm前後)試験片が破断することが確認できる。また、すべての変位速度においても、明瞭な降伏が観察された。

図10に示した、変位速度30mm/minの場合の試験片平行部の破断形状からも、PC試験片の平行部がくびれにより縮小しており、延性的な破壊を起こしていることが認められる。従って、PCは典型的な延性材料であることがわかる。一方で、PMMAはくびれ現象が観察されず、最大荷重点に達した直後に破断するため、脆性材料であることがわかる。

破断面解析は、巨視的観察に加え、破断面をビデオルーペVL-11S/SL(スカラ株式会社製)で取込み、その画像を観察した。非晶性樹脂では、比較的明確な破断面をしており観察しやすい。即ち、破壊の起点、破壊の進行方向、応力の種類による特有の破面などについて、識別しやすい破断面を示す。しかし、ポリマーの分子構造によって、異なった模様が表れる。

図11に、本試験で得たPMMAとPCの代表的な破断面を示す。PMMAでは、破壊開始点近傍には非常に滑らかな鏡面領域あり、破面状が非常に粗くなる最終破断領域を確認できた。一方で、PCの破断面では、鏡面領域が観測されなかった。また、PMMAの破断面には認められなかった特徴として、破壊の起点から破壊の進行に伴って、延性破壊の特徴である筋状のパターンが確認できた。加えて、破壊の最終部分には、明らかに引張方向に盛り上がったシャーリップが観察できた。

図12に、両試験の最大荷重時における伸びと変位速度の関係を示している。この図から、PCは変位速度が速くなっても伸びはほとんど変化しないが、PMMAは減少する傾向があり変位速度依存性が認められる。

## 5. 結言

本研究では、性質の異なる2種類の熱可塑性プラスチック材料PCとPMMAに対して、可変速式衝撃試験装置を用いた準衝撃速度領域でのプラスチック材料の引張試験を行い、引張強度・変形挙動に及ぼす変位速度の影響を調査した。それらの結果を以下に示す。

- (1) 本試験装置と万能試験機で共通に試験できる変位速度である3、30、300mm/minの3速度による比較試験の結果、両者の差はそれ程大きくなく、本試験装置と万能試験機の結果との同等性を確認できた。
- (2) PCの引張試験では、全ての変位速度において試験片が明瞭な降伏現象が現れ、典型的な延性材料の性質を示した。一方、PMMAではいずれの変位速度においてもくびれ（降伏現象）は観測されず、伸びは最大でも1.5mm程度で、ぜい性的に破壊したことがわかる。
- (3) 本試験ではロータリーエンコーダを使用して変位を算出しているが、主軸と円盤先端に取り付けてある打撃刃には距離があり、エンコーダ分解能  $0.1^\circ$  の回転で、打撃位置において0.43633mmの変位量に相当するため、正確な変位算出ができなかった。今後、より信頼できる変位を算出するため、新たな変位の計測手法あるいは算出手法の検討が必要である。
- (4) PMMAの最大荷重時の伸びは変位速度の増加に伴い低下し変位速度依存性が認められるが、PCでは単調的に低下することはなく、最大荷重時の伸びは変位速度にほとんど影響しない。

## 6. 参考文献

- (1) 内田 武・八児 明範；プラスチック材料の破壊じん性に関する研究、北九州工業高等専門学校研究報告書、（2009）
- (2) 内田 武・寺坂 知幸・濱田 大樹；可変速3点曲げ衝撃試験装置の開発、北九州工業高等専門学校研究報告書、（2008）
- (3) 内田 武・中村 太亮・堀 航；可変速3点曲げ衝撃試験装置の改良、北九州工業高等専門学校卒業論文、（2010）

（2014年11月10日 受理）