SHIMADZU
Excellence in Science

Application News

No. i266

高速衝撃試験機

プラスチック材料の静的および高速引張試験における力学的特性の評価と破面観察

近年、プラスチック材料はその熱的特性や軽量性から、細かな歯車から自動車や航空機などの様々な工業分野、用途で使用されています。輸送機における衝突事故や製品の落下などでは動的な変形が生じており、信頼性の確保のためには、従来より実施されてきた静的試験だけでなく、衝撃試験も実施する必要があります。特にプラスチックを構成している高分子は、粘性と弾性とを合わせもつ粘弾性特性を示すため、力学的特性は、温度環境や時間、変形速度依存性を示します[1)]。

一方で、損傷や破壊事故、劣化現象が生じた場合、その調査、対策が急務となってきます。プラスチックの破壊には、静的破壊、衝撃破壊、疲労破壊、クリープ破壊、環境による破壊、劣化による破壊など様々なものがあり、それぞれ破壊の種類によって、特徴のある破面が観察されます[2)]。つまり、破面観察を行うことで、損傷の原因を特定でき、原因の解決策を検討できる可能性があるといえます。

今回は、アクリル樹脂（PMMA）とポリプロピレン（PP）の速度依存性を、精密万能試験機 AG-Xplus と高速衝撃試験機 HITS™-TX を使用して評価しました。また、それぞれの条件における試験後の試験片の破面を電子線マイクロアナライザ EPMA™（EPMA-8050G、以下 EPMA）を使用して観察しました。

F.Yano, T.Ono, K. Kawane

■速度依存性の評価システム

静的引張試験には精密万能試験機 AG-Xplus を、高速引張試験には HITS-TX を使用しました。試験の様子を図 1 に示します。また、今回使用した試験装置を表 1 に示します。

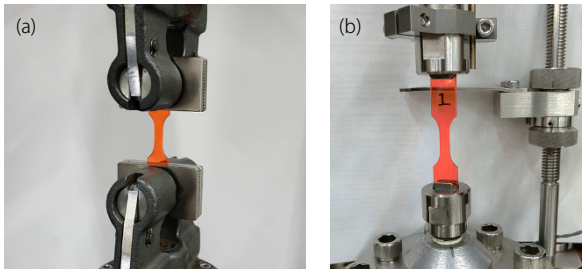

図 1　試験の様子
(a) 静的引張試験の様子　(b) 高速引張試験の様子

表 1　試験装置

試験機	：AG-Xplus（静的引張試験） HITS-TX（高速引張試験）
ロードセル	：10 kN
つかみ具	：空気式平行締めつかみ具（静的引張試験） 平板つかみ具（高速引張試験）

■試験結果

今回は PMMA と PP を試験片に引張試験を実施しました。静的引張試験における試験速度は、PMMA では 5 mm/min、PP では 1000 mm/min に設定しました。高速引張試験における試験速度は、ともに 10 m/sec に設定しました。試験条件を表 2 にまとめます。

応力 - ストローク線図を図 2 に、試験結果を表 3 に示します。PMMA、PP ともに静的引張試験より高速引張試験の引張強さが大きくなっています。つまり、これらのプラスチック材料の引張強さに試験速度依存性が確認されました。

表 2　試験条件

試験速度	：5 mm/min（PMMA 静的引張試験） 1000 mm/min（PP 静的引張試験） 10 m/sec（高速引張試験）
試験片	：PMMA（幅：5 mm、厚さ：2 mm） PP（幅：3 mm、厚さ：3 mm）

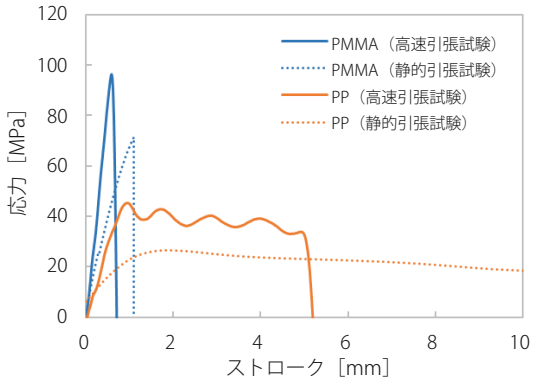

図 2　応力 - ストローク線図

表 3　試験結果

試験片	引張強さ［MPa］
PMMA（高速引張試験）	96.2
PMMA（静的引張試験）	71.3
PP（高速引張試験）	45.5
PP（静的引張試験）	26.4

■PMMA の破面観察

試験後の PMMA の破面の表面に金をコーティングし、光学顕微鏡と EPMA で観察しました。PMMA の静的引張試験による破面を図 3 に、PMMA の高速引張試験における破面を図 4 に示します。それぞれ (a) は光学顕微鏡像、(b) ～ (l) は EPMA による 2 次電子像を示します。

静的引張試験の破面（図 3 (a) ）をみると、き裂は左端において発生し、右方向へ進展したと推定されます。図 3 (a) の左端、中央、右端の EPMA による 2 次電子像を図 3 (b) ～ (d) に示します。き裂発生点の図 3 (b) 左端には特徴のない平坦な面が認められ、き裂が進展するに従い、図 3 (e) とその拡大図 (i) のように進展方向に引き伸ばされたパラボラ模様が、さらに進展域では図 3 (f) とその拡大図 (j) のように等軸状のパラボラ模様が観察されます。このパラボラ模様は、伝播するメインクラックの前方にて、樹脂中の不純物等を核として発生するサブクラックによるものと考えられています [3]。メインクラックが加速することで、パラボラ模様の形状に変化が生じたと考えられます。破面中央付近においても、図 3 (g) とその拡大図 (k) のように等軸状のパラボラ模様が観察されましたが、図 3 (c) のマクロな視野では、左側に比べて段差の大きなブロック状の破面となっていることから、き裂の進展がさらに加速されたと考えられます。

一方、高速引張試験による破面（図 4）でも、き裂発生点と推定される破面左上部に静的引張試験の破面と同様な進展方向に引き伸ばされたパラボラ模様（図 4 (e) とその拡大図 (l) ）や、等軸状のパラボラ模様（図 4 (f) とその拡大図 (j) ）が認められました。ただし、その領域が比較的狭いことから、クラック発生後、速やかにき裂の加速が生じたと推測できます。破面中央付近は、静的引張試験と同様にブロック状の破面（図 4 (g) ）が観察され、等軸状のパラボラ模様（図 4 (k) ）も観察されました。

最後に、両破面の最終破断部に注目します。どちらも比較的平坦なパラボラ模様が確認できました。図 4 (h) とその拡大図 (l) には進展方向に引き伸ばされたパラボラ模様も確認することができ、最終破断時にはそれまでと異なり、き裂の進展速度が減速した可能性があります。

■PP の破面観察

PMMA と同様に、試験後の PP の破面の表面に金をコーティングし、光学顕微鏡と EPMA で観察しました。PP の静的引張試験による破面を図 5 に、高速引張試験による破面を図 6 に示します。それぞれ (a) は光学顕微鏡像、(b) ～ (l) は EPMA による 2 次電子像を示します。

静的引張試験の破面は、高速引張試験の破面に比べて面積が小さくなっており、ネッキングを伴いながら塑性変形して破壊したことが分かります。図 5 (b) の破面中心部には延性的に伸びた繊維状の破面が観察されました。図 5 (b) の左側と中央付近を拡大した 2 次電子像を図 5 (c) (d) に示します。図 5 (d) や、さらに拡大した図 5 (e) ～ (h) をみると、樹脂が繊維状に伸びている様子がわかります。一方、図 5 (c) の破面の外周部を拡大観察すると、図 5 (i) のように破面上に多くの穴が認められますが、これは樹脂中の弱い部分（例えば低分子）や不純物が核となって微小空洞が形成されたことによると考えられます。さらに拡大した図 5 (j) ～ (l) には、樹脂が伸びている様子も観察されました。

高速引張試験の場合は破断部にくびれがなく、破面全域に平坦で粗いフレーク状の模様が観察されました。つまり、試験速度を上げることで塑性変形を伴わない脆性的な破壊が生じたと考えられます。破面の中央部を拡大した画像を図 6 (d)、(e) ～ (h) に、外周部を拡大した画像を図 6 (c)、(i) ～ (l) に示します。中央部と外周部とで破面模様に大きな差は認められず、破面全域に微小空洞を多く持つ破面が見られました。また、局所的には樹脂が繊維状に伸びている部位もみられることから、ミクロスケールでは塑性変形を伴って破壊が進行したと考えられます。

■まとめ

今回、精密万能試験機 AG-Xplus と高速衝撃試験機 HITS-TX を使用して PMMA と PP の引張強さを測定しました。試験速度を速くすることで PMMA、PP の引張強さも上昇しており、引張強さに速度依存性が確認されました。また、それぞれの破面を電子線マイクロアナライザ EPMA-8050G を使用して観察しました。それぞれのプラスチック材料で静的引張試験、高速引張試験で特徴的な破面が観察され、損傷の原因を特定できる可能性が示唆されました。

当社試験システムを使用することで、より正確な安全性・信頼性の評価や製品の損傷の原因解析に役立てていただくことができます。

参考文献
1) 宮入裕夫、最新 材料の性能・評価技術（2014）
2) 藤木榮、萩原利哉、プラスチック材料の破壊・破断面の見方（2015）
3) 成澤 郁夫 監修、高分子材料のフラクトグラフィ（2011）

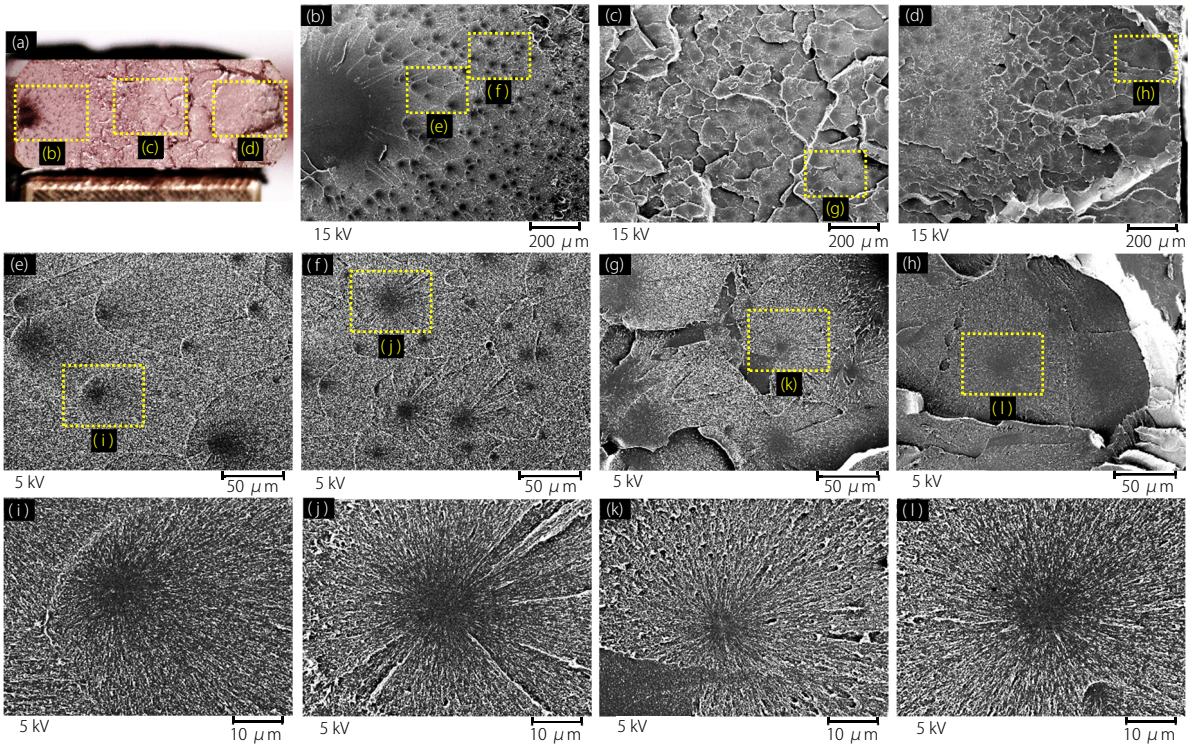

図 3　PMMA の静的引張試験における破面観察
(a) 光学顕微鏡像　(b) ～ (l) 2 次電子像

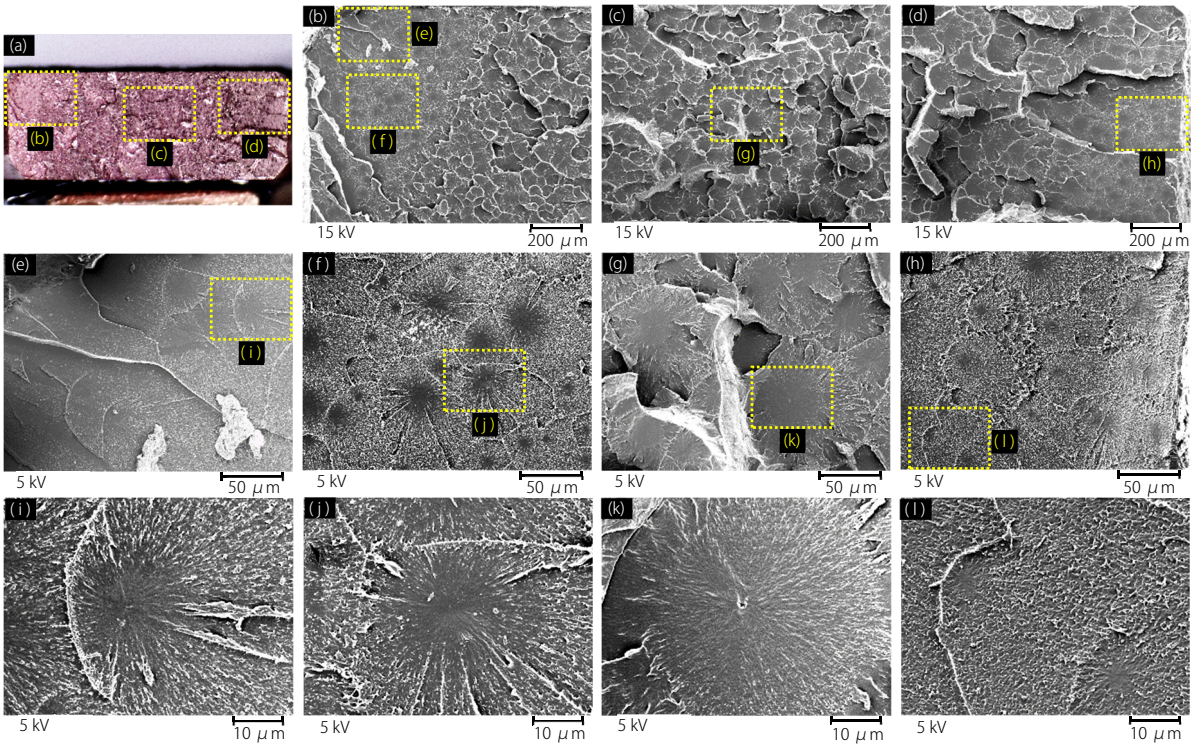

図 4　PMMA の高速引張試験における破面観察
(a) 光学顕微鏡像　(b) ～ (l) 2 次電子像

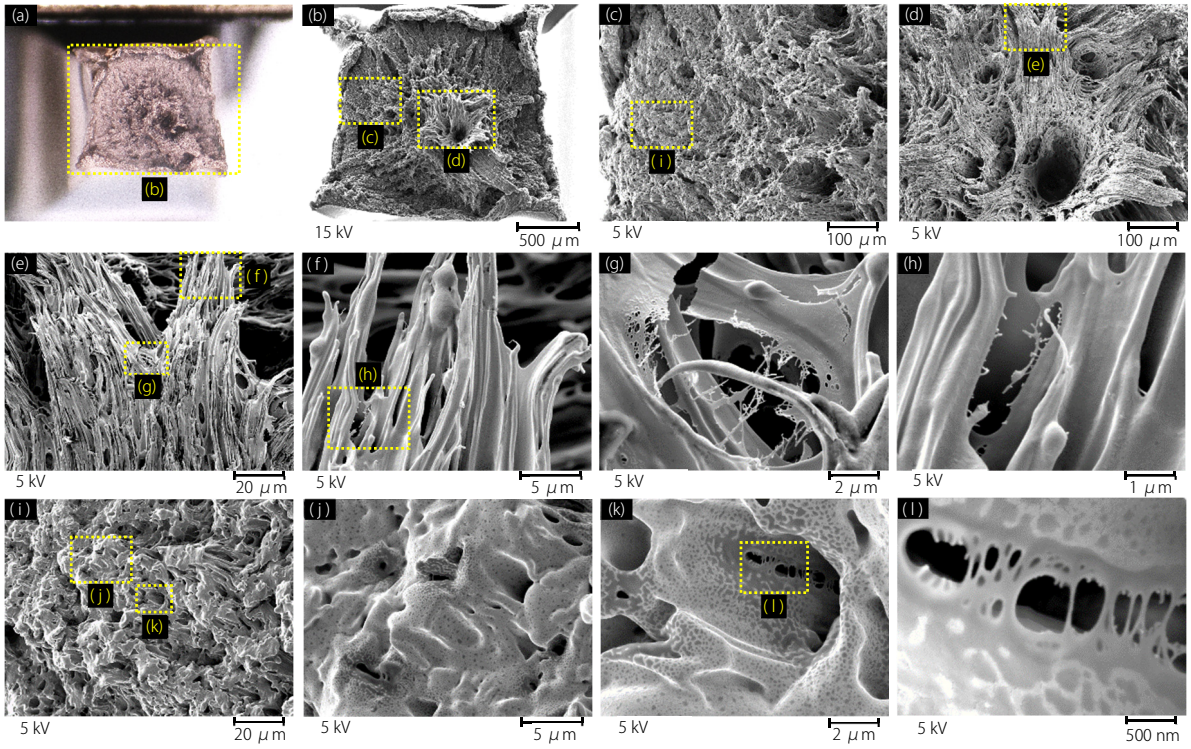

図 5　PP の静的引張試験における破面観察
(a) 光学顕微鏡像　(b) ～ (l) 2 次電子像

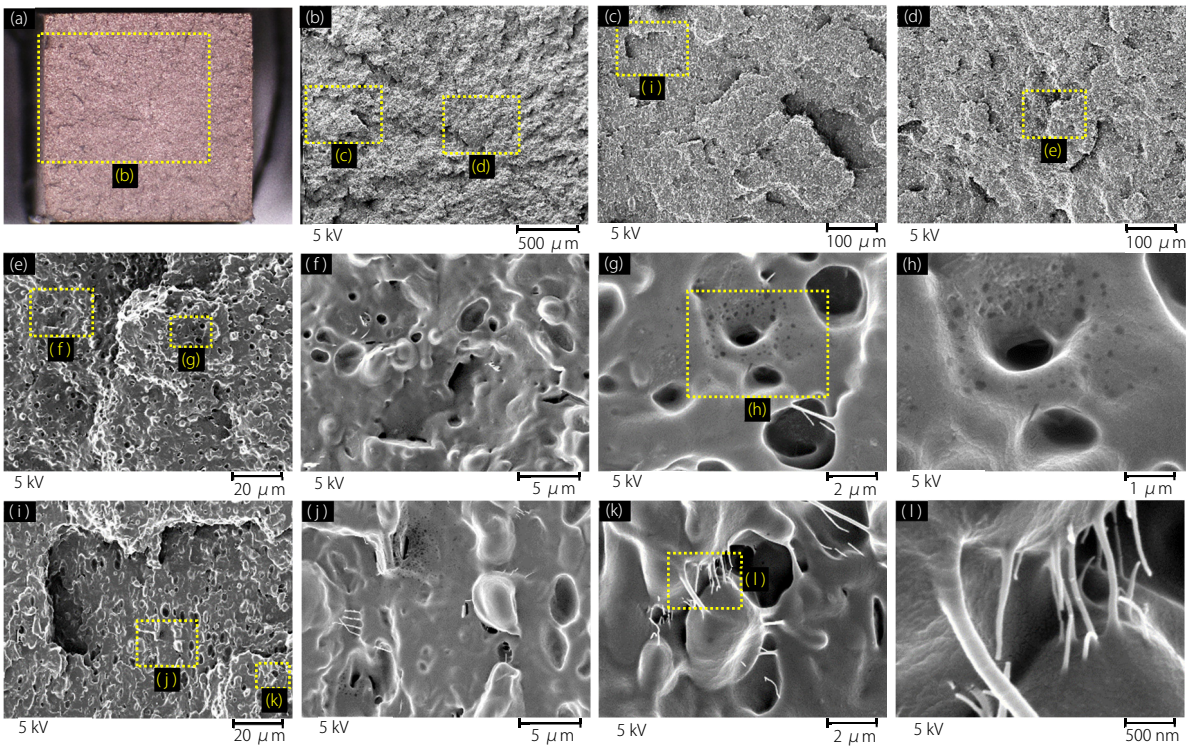

図 6　PP の高速引張試験における破面観察
(a) 光学顕微鏡像　(b) ～ (l) 2 次電子像

HITS および EPMA は、株式会社 島津製作所の商標です。

株式会社 島津製作所　分析計測事業部
グローバルアプリケーション開発センター
島津コールセンター　0120-131691
(075) 813-1691

初版発行：2018 年 11 月

※本資料は発行時の情報に基づいて作成されており、予告なく改訂することがあります。
改訂版は下記の会員制 Web Solutions Navigator で閲覧できます。
https://solutions.shimadzu.co.jp/solnavi/solnavi.htm

会員制情報サービス「Shim-Solutions Club」にご登録ください。
https://solutions.shimadzu.co.jp/
会員制 Web の閲覧だけでなく、いろいろな情報サービスが受けられます。