

促進耐候性試験によるポリプロピレン/デグラノボン
ポリマーブレンドの圧縮特性の変化

西田政弘* 夏目りえ**

福田徳生*** 伊東寛明****

Change in Compressive Properties of Polypropylene/Degra-Novon
Polymer Blends Due to Accelerated Weathering Tests

by

Masahiro Nishida*, Rie Natsume**, Norio Fukuda*** and Hiroaki Ito****

After accelerated weathering, dynamic and static compressive properties of polypropylene and Degra-Novon blends were measured using a split Hopkinson pressure bar and universal testing machine. Degra-Novon is an additive mixed with traditional plastics that promotes the spontaneous decomposition of the plastics by sunlight, heat, and microorganisms in soil and water. The use of Degra-Novon achieves a low-cost, biodegradable polymer. The change in yield stress and Young's modulus were examined in detail. The relationship between the compressive properties, differential scanning calorimeter results, and Fourier transform infrared spectroscopy data was discussed.

Key words: Biodegradable polymer, Oxidation decomposition, Weatherability, Compressive properties, Split-Hopkinson pressure bar, Deterioration behavior

1 緒 言

地球環境保護や廃棄物処理の問題から、使用後には、微生物によって水と二酸化炭素に分解される生分解性プラスチックに注目が集まっている。また、石油資源枯渇やカーボンニュートラルの観点から、植物由来（バイオマス）プラスチックの研究・開発も進められている。生分解性を有し、植物由来プラスチックでもあるポリ乳酸は、通常のプラスチックと比べ、ぜい性で、耐衝撃性や耐熱性が低く、成形加工性にも問題があり、これらを改善すべく、多くの研究が行われてきた。さらに、原料費が高く、汎用プラスチックより長い成形時間が必要とされており、それらにより製品のコストがさらに高くなるという問題がある。そこで、ポリ乳酸に、安価なバイオマス材料であるデンプンをブレンドし、強度の低下を最小限にしつつ、コストを下げる研究が行われている¹⁻⁴⁾。最近では、安宅・上村が、デンプン粉末の射出成形技術を開発し⁵⁾、ポリ乳酸、ポリブチレンアジペートテレレート (PBAT)、デンプンからなる三成分系ポリマーブレンドを作製し、その力学特性を詳しく調べている⁶⁻⁷⁾。

一方で、石油由来の汎用プラスチックの一つであるポリプロピレンに、酸化分解助剤（デグラノボン、ノボン・ジャパン株式会社）を添加することにより、生分解性を付与するとともに、廉価な商品開発を目指す試みがある。デグラノボンは汎用プラスチックに比べると高価であるが、生分解性プラスチックに比べると安価なため、汎用プラスチックに添加することにより、廉価で生分解性

を有した材料となる⁸⁻⁹⁾。この特長を生かして、ゴミ袋、梱包資材などの商品化が行われている。

しかし、ポリプロピレンにデグラノボンを添加したことによる力学特性の変化および品質保持期間（寿命）には未だ不明な点もある¹⁰⁻¹¹⁾。また、生分解性材料の基本的特性として、静的特性が主に調べられており、衝撃特性が調べられている場合でも、アイゾットもしくはシャルピー衝撃試験が行われているのみで、高ひずみ速度域での応力-ひずみ曲線はほとんど調べられていない。そこで、本研究では、混合比の異なるポリプロピレン/デグラノボンのブレンド材を作製し、その耐候性を調べるために、促進耐候性試験機（サンシャインウェザーメーター）を用いて、劣化促進させた試験片を準備し、その衝撃および準静的圧縮特性の変化を調べた。なお、本研究では、引張特性に比べ基本的な特性である圧縮特性に注目した。さらに、示差走査熱分析（DSC : Differential scanning calorimetry）およびフーリエ変換赤外分光分析（FT-IR : Fourier transform infrared spectroscopy）を用いて、融点、再結晶温度および分子構造（官能基）の変化も調べ、圧縮特性との関係を考察した。

2 材料および試験片

材料として、ポリプロピレン（住友化学株式会社、住友ノーブレン AY564）とデグラノボン（ノボン・ジャパン株式会社、EPP-N）のポリマーブレンド材を用いた。デグラノボンはポリプロピレンの直鎖に作用し、熱、酸素や光によって低分子化し酸化分解するように開発さ

+ 原稿受理 平成24年3月12日 Received

* 正会員 名古屋工業大学大学院 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町, Nagoya Institute of Technology, Showa-ku, Nagoya 466-8555

** 名古屋工業大学 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町, Nagoya Institute of Technology, Showa-ku, Nagoya 466-8555

*** あいち産業科学技術総合センター・本部 〒470-0356 愛知県豊田市八草町, Aichi Center for Industry and Science Technology, Toyota-shi, Aichi, 470-0356

**** あいち産業科学技術総合センター・産業技術センター 〒448-0013 愛知県刈谷市恩田町, Aichi Center for Industry and Science Technology, Kariya-shi, Aichi, 448-0013

れており、従来の生分解性プラスチックとは分解機構が異なっているという点¹²⁾でも、本研究の意義は深い。一般に、高分子材料は熱や紫外線、酸素などで劣化するため、材料の製造過程で劣化を防止するための添加剤が加えられる。デグラノボンはそれらの添加剤とは逆の性質をあえて付与することになる。

推奨されているポリプロピレンとデグラノボンの混合比(重量比)は 80 : 20 であり、デグラノボンの混合比がそれ以下では性能を発揮しないことがある¹³⁾。本研究では、デグラノボンの混合割合を増加させたときの分解速度と圧縮特性の変化およびデグラノボン単体の特性変化を調べるために、その混合比は、80 : 20, 60 : 40, 0 : 100 の 3 種類とした。

ポリプロピレンとデグラノボンのペレットを、180℃、回転数 300 rpm で二軸押出機(φ:20mm, L/D : 30; 株式会社テクノベル)により熔融混練後、得られたストランドを水冷・ペレタイズして乾燥させた。その後、ホットプレスを用いて 180℃、5 MPa で 30 分間、加熱圧縮成形することで、厚さ 10 mm の板材を作製した。ポリプロピレンとデグラノボンの各特性を Table 1 および Table 2 に示す。厚さ 10 mm の板材から、機械加工により、圧縮試験片を作製した。準静的圧縮試験片では、ASTM D695-02a を参考にして、直径 8 mm、高さ 12 mm(細長比 1.5)、衝撃圧縮試験片では、直径 12 mm、厚さ 4.8 mm(細長比 0.4)とした。ホプキンソン棒法に適しているとされる細長比 0.3~0.4¹⁵⁾を参考に、試験片の前面と後面の平衡が満足できる範囲でできるだけ長くした。なお、加工後の熱処理は、特に行っていない。

圧縮試験前に、作製した板の凍結破断面を走査型電子顕微鏡(株式会社日立製作所:S-3000N)により観察した。それぞれの試験片について数ヶ所を観察したが、Fig. 1 に示すように、ポリプロピレンもしくはデグラノボンの粒子は確認できず、どの混合比においても、ほぼ均一に相溶していることがわかる。

促進耐候性試験は、屋内外の条件を人工的に再現するサンシャインウェザーメーター(スガ試験機株式会社, S80, 光源:サンシャインカーボンアーク)を用いて行った。条件は JIS B 7753 に基づき、ブラックパネル温度は 63℃、水噴射は 120 分中 18 分間とした。試験時間は、75 時間の連続運転時間が 1 サイクルなので、一回目の実験では、8 個の試験片を準備し、開始から 75 時間後と 150 時間後に 3 個、275 時間後に 2 個ずつ取りだし、二回目では、6 個の試験片を準備し、開始から 150 時間後、300 時間後に 3 個ずつ取りだした。一回目と二回目の 150 時間後には大きな差がみられず、再現性を確認した。なお、4・1 節、4・2 節ではそれらの結果を合わせて示した。圧縮試験片の四隅をアクリル板(150 mm × 70 mm)に接着し、そのアクリル板をサンシャインウェザーメーターの固定板に設置した。それにより、試験片の底面以外のすべての面に照射されることになる。用いた装置の分光放射照度分布を Fig. 2 に示す¹⁶⁾。なお、促進耐候性試験

により、試験片の色は黄色から白色に徐々に変化していった。特に、デグラノボン単体の試験片で変色が顕著であった。また、今回の促進耐候性試験では、試験前後で試験片の質量はほとんど変化せず、圧縮特性に与える吸水の影響はほとんどないと考えている。

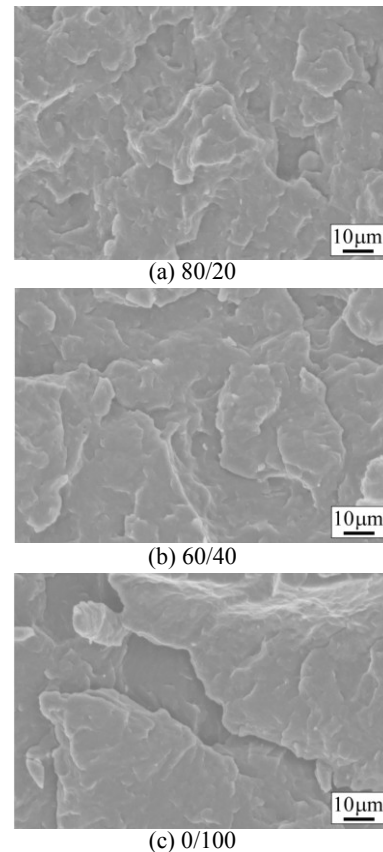


Fig. 1 Photographs of cryo-fractured surfaces before compressive tests.

Table 1 Properties of polypropylene (Sumitomo NOBLEN, AY564)¹⁴⁾

Density [kg/m ³]	900
Melt flow rate [g/10min]	15
Melting point [°C]	120-176
Tensile yield stress[MPa]	27
Charpy impact strength [kJ/m ²]	9

Table 2 Properties of Degra-Novon (EPP-N)¹³⁾

Density [kg/m ³]	930
Melt flow rate [g/10min]	6-7
Melting point [°C]	165-170

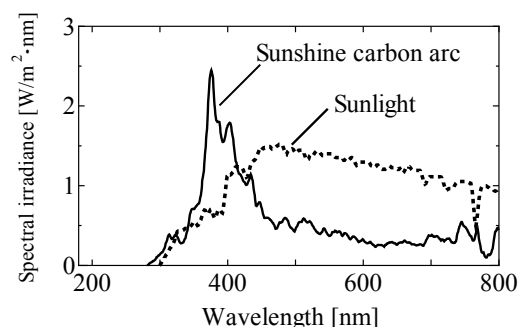


Fig. 2 Distribution of spectral irradiance¹⁶⁾.

3 圧縮試験装置

準静的圧縮試験には、万能試験機（株式会社エー・アンド・デイ，RTM-500）を用い，衝撃圧縮試験には，Fig. 3 に示すスプリットホプキンソン棒法を用いた．ホプキンソン棒法では，一次元波動伝ば理論に基づいて，試験片の平均応力および平均ひずみをそれぞれ，

$$\sigma_{av}(t) = \frac{AE}{A_S} \varepsilon_T(t) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{av}(t) = \frac{2c_3}{L} \int_0^t [\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (2)$$

と表すことができる¹⁷⁻¹⁸⁾．ここで， $\varepsilon_I(t)$ ， $\varepsilon_R(t)$ および $\varepsilon_T(t)$ は，それぞれ入射波，反射波，透過波によって生じたひずみである．また， E および c_3 は入出力棒の縦弾性係数および棒波速度である． L は試験片厚さ， A および A_S は，入出力棒および試験片の断面積である．入出力棒に用いたアルミニウム合金 A2024 の物性値を Table 3 に示す．なお，ひずみ速度は，ひずみ-ひずみ速度線図の平均値から求めた¹⁹⁾．

また，試験片の温度管理は，万能試験機では試験片近くの圧縮板，ホプキンソン棒法では入出力棒にラバーヒーターを巻いて間接的にを行った．その結果，実験時の試験片の温度は， $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ （JIS 規格 K7100：標準温度状態 2 級）で，実験室の湿度は約 20%（標準湿度状態 3 級）であった．なお，試験片は実験の直前までデシケータに置いておき，実験の直前に入出力棒間に設置した．

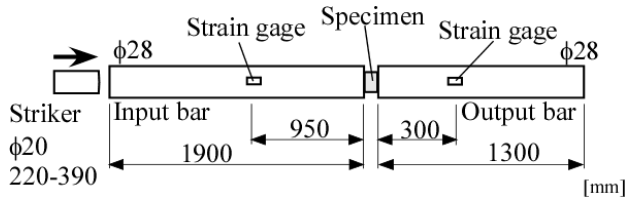


Fig. 3 Experimental setup for split Hopkinson pressure bar method.

Table 3 Material constants of input and output bars used in calculation.

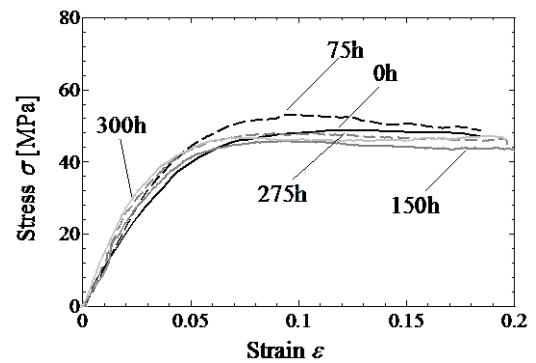
Density	Elastic wave velocity in bar, c_3	Young's modulus E
$2.77 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	5150 m/s	73.6 GPa

4 結果および考察

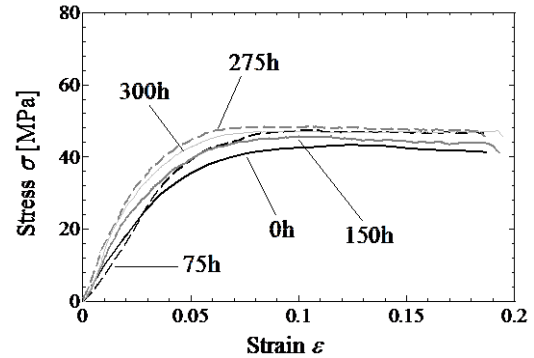
4・1 準静的圧縮試験の結果

促進耐候性試験を行った試験片に対して準静的圧縮試験（ロードセルヘッド速度 1.2 mm/min，ひずみ速度 $1.67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）から得られた応力-ひずみ曲線を Fig. 4 に示す．デグラノボン単体（ポリプロピレン：デグラノボン=0：100）の場合は，促進耐候性試験が応力-ひずみ曲線に与える影響はほとんどみられず，比較的似た曲線となっている．それに対し，ブレンド材（ポリプロピレ

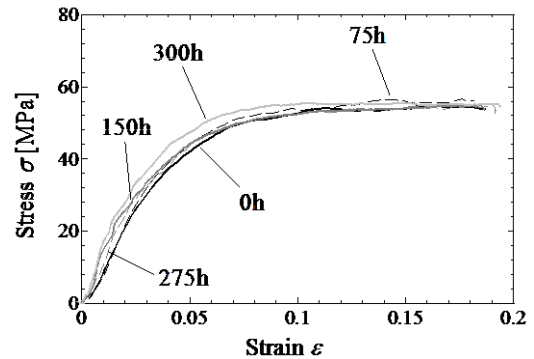
ン：デグラノボン=80：20 および 60：40）では，促進耐候性試験により応力-ひずみ曲線は少し変化した，それには明確な傾向はみられなかった．応力-ひずみ曲線のばらつきは，降伏応力で $\pm 4.9 \text{ MPa}$ ，縦弾性係数で $\pm 0.2 \text{ GPa}$ であった．一方で，上で述べたように，デグラノボン単体（ポリプロピレン：デグラノボン=0：100）で促進耐候性試験を行った場合やブレンド材で促進耐候性試験を行っていない場合では，降伏応力で $\pm 2.0 \text{ MPa}$ ，縦弾性係数で $\pm 0.1 \text{ GPa}$ のみのばらつきで，ばらつきはほとんどみられなかった．促進耐候性試験の影響は試験片表面もしくはその近傍で大きいことが予想され，それによりこのような結果が得られたと考えている．



(a) Polypropylene : Degra-Novon = 80 : 20



(b) Polypropylene : Degra-Novon = 60 : 40



(c) Polypropylene : Degra-Novon = 0 : 100

Fig. 4 Effect of exposure times on stress-strain curve at low strain rates.

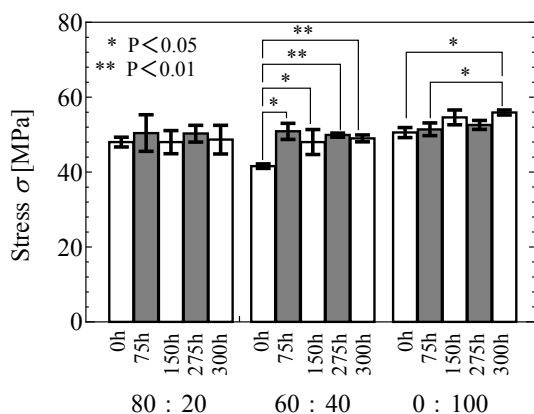


Fig. 5 Effect of exposure times on yield stress at low strain rates.

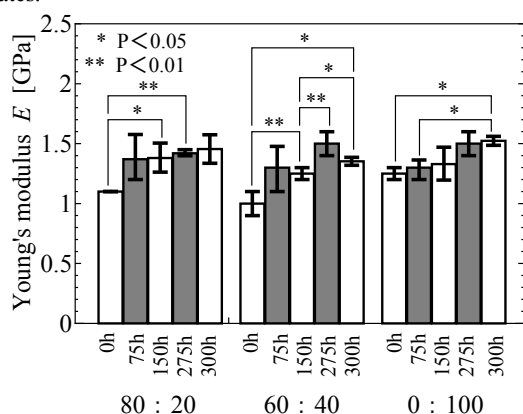


Fig. 6 Effect of exposure times on Young's modulus at low strain rates.

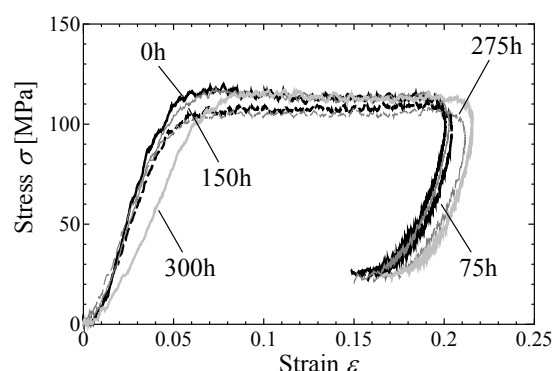
それぞれの条件下での実験結果について、降伏応力および縦弾性係数の平均値、標準偏差および有意差検定の計算結果を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。降伏応力については、最大値を示す場合は、応力-ひずみ曲線の最大値を用い、最大値を示さない場合は、応力-ひずみ曲線の立ち上がり部分で傾きがほぼ一定の領域と降伏後の応力増加量がほぼ一定の領域を直線近似し、その交点の値を降伏応力とした。また、応力-ひずみ曲線の 0~2% ひずみ域を縦弾性係数の計算に用いた。なお、有意差検定はスチューデントの t 検定を用いており、 $P<0.05$ (95% 信頼区間) は有意水準 5% で有意差があり、 $P<0.01$ (99% 信頼区間) は有意水準 1% で有意差があることを意味している。また、有意差ありの場合のみを図中に示しており、有意差検定の結果が示されていない場合は、有意差なしを意味している。

まず、降伏応力について、混合比の違いのみを比べると、混合比 0 : 100 が最も降伏応力が大きく、60 : 40 が最も小さかった。この傾向は試験時間に依存しなかった。次に、試験時間の影響をみてみると、混合比 60 : 40 と 0 : 100 では、降伏応力と縦弾性係数は変動し、80 : 20 では縦弾性係数の結果は変動し、有意差も見られたが一定の傾向は見られなかった。80 : 20 の降伏応力はほとんど変動しなかった。しかし、60 : 40 と 0 : 100 では、0 時間（耐侯試験前）と 300 時間後の結果を比べると、300 時

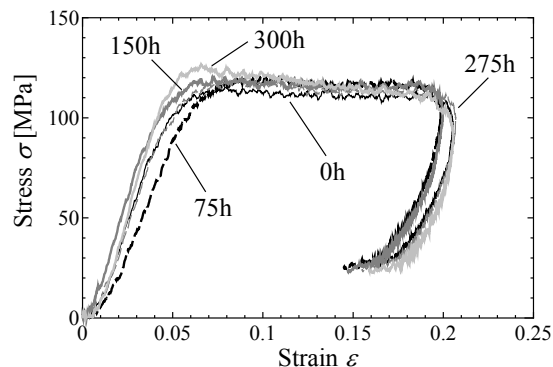
間後の方の降伏応力および縦弾性係数が常に大きくなっており、変動しながらも、降伏応力および縦弾性係数が試験時間とともに増加する傾向が認められた。変動する理由として、酸化および低分子量化の劣化過程で、圧縮特性が試験時間に比例して変化するわけではないこと、さらに、表面から一様に劣化するわけではないことが考えられるが、詳細は不明で、今後は劣化過程をさらに詳しく調べる必要がある。

4・2 衝撃圧縮試験の結果

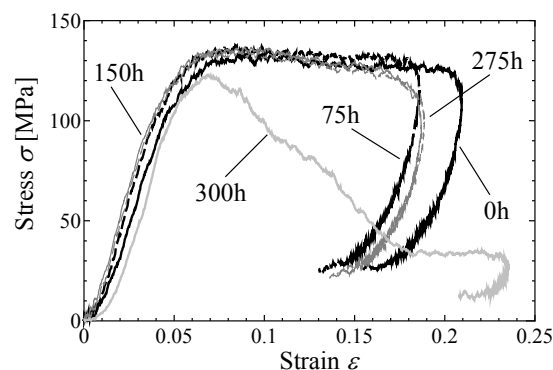
Fig. 7 に、衝撃圧縮試験（ひずみ速度 900~1100 s^{-1} ）から得られた応力-ひずみ曲線を示す。ホプキンソン棒法では、測定原理から縦弾性係数の精度は低いものの、ポリプロピレン：デグラノボン=80 : 20 の 300 時間後は明らかに小さくなった。60 : 40 では、応力-ひずみ曲線



(a) Polypropylene : Degra-Novon = 80 : 20



(b) Polypropylene : Degra-Novon = 60 : 40



(c) Polypropylene : Degra-Novon = 0 : 100

Fig. 7 Effect of exposure times on stress-strain curve at high strain rates.

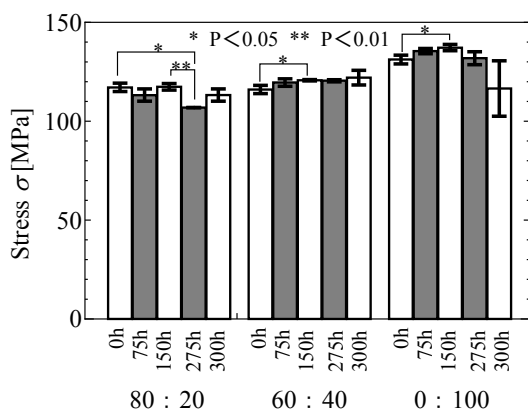
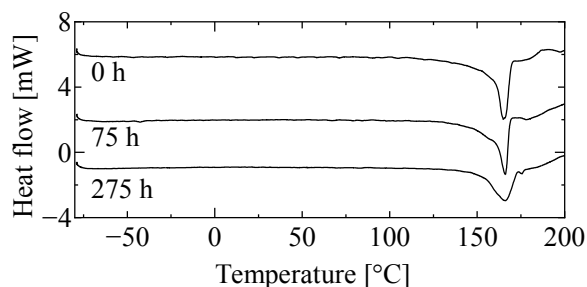


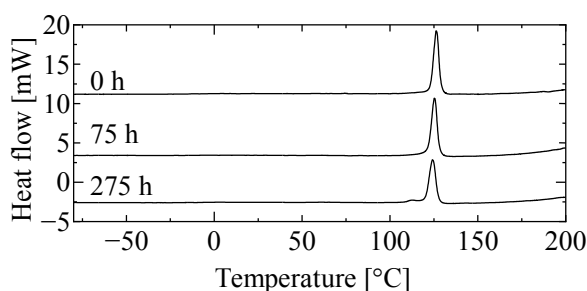
Fig. 8 Effect of exposure times on yield stress at high strain rates.

の初期勾配（縦弾性係数）は変動し、促進耐候性試験の影響が若干みられるものの、この場合は明確な傾向はみられなかった。Fig. 7(c)に示した 0 : 100 の 300 時間後では、応力が最大値を示した後、急激に低下していった。このように、0 : 100 は 300 時間後で明確に衝撃強度が低下している。それ以外の場合では、応力-ひずみ曲線の形（ひずみ軟化の有無など）は似かよっており、混合比および試験時間の影響は小さいことがわかる。

降伏応力の平均値、標準偏差および有意差検定の計算結果を Fig. 8 に示す。ここで、降伏応力の評価法および有意差検定の方法は、準静的圧縮試験の場合と同様である。降伏応力について、混合比の違いのみで比べると、準静的圧縮試験同様、0 時間（耐候試験前）では混合比 0 : 100 が最も降伏応力が大きく、60 : 40 が最も小さかった。しかし、75 時間以降ではデグラノボンが増すにつれて降伏応力が増加しているが、300 時間後では 0 : 100 の降伏応力が急激に低下している。



(a) When increasing temperature



(b) When decreasing temperature

Fig. 9 Effect of exposure times on differential scanning calorimetry (60 : 40).

Table 4 Melting point and recrystallization temperature after accelerated weathering

Exposure duration	Melting point	Recrystallization temperature
0 hours	164.9°C	126.3°C
75 hours	166.0°C	125.2°C
275 hours	166.0°C	124.1°C

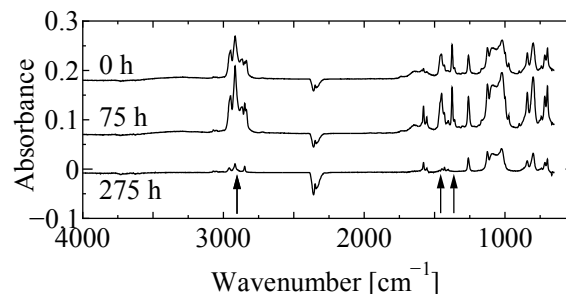


Fig. 10 FT-IR spectra of specimens (60 : 40).

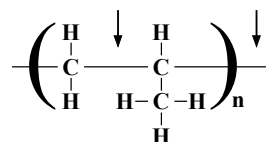


Fig.11 Molecular formula of polypropylene

次に、試験時間の影響をみてみると、80 : 20 では、275 時間後の結果は、150 時間後に比べ、有意な差で降伏応力が低下しており、60 : 40 では試験時間が長くなるにつれて、僅かずつ降伏応力が増加していった。

4・3 示差走査熱分析およびフーリエ変換赤外分光分析の結果

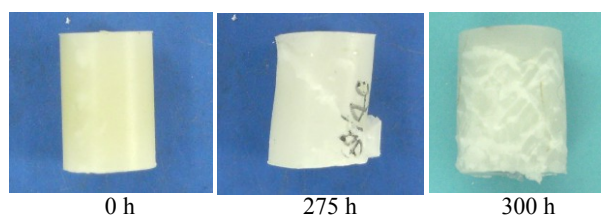
準静的圧縮試験の降伏応力および縦弾性係数が、混合比 60 : 40 で大きく変動したので、混合比 60 : 40 の試験時間 75 時間、275 時間および 0 時間（耐候試験前）に対して、示差走査熱分析（株式会社リガク製 Thermo Plus2/DSC8230）を行った。昇温速度および降温速度は 5°C/分である。測定結果を Fig. 9 および Table 4 に示す。ポリプロピレンの融点および再結晶温度はほぼ同じであることがわかる。試験時間の違いにより、それらは変化しなかった。しかしながら、275 時間後には融解ピークがブロードとなっており、分子構造の乱れが示唆された。

次に、フーリエ変換赤外分光分析（FT-IR：日本分光株式会社製 FT/IR-6300）により、混合比 60 : 40 の分子構造（官能基）の変化を調べた結果を Fig. 10 に示す。試験時間 75 時間後の結果では変化が見られなかったが、275 時間後では約 1380 cm⁻¹、1460 cm⁻¹、2850~2870 cm⁻¹ におけるピークが消滅している。波数 1380 cm⁻¹ はメチル基の対称変角振動、1460 cm⁻¹ はメチレン基のはさみ振動、2850~2870 cm⁻¹ はメチル基およびメチレン基の伸縮振動にあたる²⁰⁻²¹⁾。このことから、生成されたラジカルと酸素が反応し、自動酸化的に反応が進むことにより、ポリプロピレンの分子式を示した Fig.11 の矢印で示した部分、すなわち、メチル基（-CH₃-）とメチレン基（-CH₂-）の結合部分が切断され、低分子量化を起し、

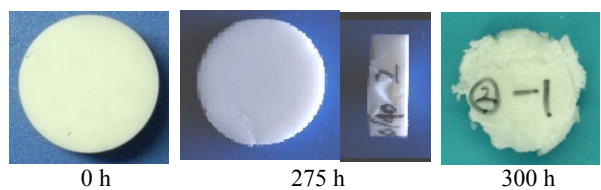
圧縮特性が変化すると予想している。また、75 時間後と 275 時間後では、約 1650 cm^{-1} において明確なピークが確認できる。波数 1650 cm^{-1} はカルボニル基 ($\text{C}=\text{O}$) の伸縮振動にあたる。よって、促進耐候性試験によって Fig.11 で示した矢印部分の結合が切断され、そこに空気中の酸素と結合したことによって、酸化分解が生じたものと考えられる。

4・4 実験後の試験片

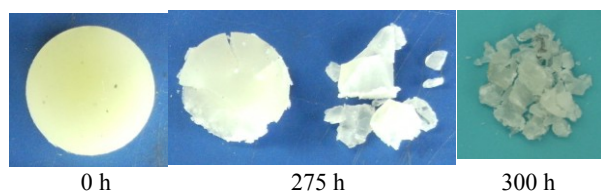
Fig. 12 に実験後の試験片を示す。準静的圧縮試験では、混合比 60 : 40 の耐候試験前の試験片では、ほぼ円柱形状を保ったまま変形しているのに対し、試験時間 275 時間後では、せん断破壊が観察できる。また、300 時間後では表面に亀裂や剥がれが確認できた。Fig. 12(b) に示した衝撃圧縮試験の結果では、混合比 60 : 40 の 275 時間後では試験片の一部が欠けており、300 時間後になると 275 時間後よりも大きな亀裂や割れが確認された。0 : 100 の 275 時間後では、大きなき裂が観察でき、大きな破片が回収された。300 時間後になると試験片が粉々になった。この様子は 80 : 20 および 0 : 100 の場合でも観察された。このように、耐候試験により試験後の試験片に変化が見られ、特に、衝撃圧縮時に、延性が低下していることがわかる。この結果は、前節の FT-IR の結果とも対応している。なお、延性については今後、引張試験を行い、破断伸びを詳細に調べる必要がある。



(a) 60 : 40 at low strain rates



(b) 60 : 40 at high strain rates



(c) 0 : 100 at high strain rates

Fig. 12 Photographs after compressive testes.

5 結 言

ポリプロピレン／デグラノボンポリマーブレンドについて、促進耐候試験前後の試験片の衝撃圧縮特性および準静的圧縮特性を比較検討した。本研究の実験条件下では、混合比 60 : 40、0 : 100 の準静的圧縮試験時の降

伏応力および縦弾性係数は変動しながらも増加した。混合比 80 : 20 の降伏応力はほとんど変化しなかったが、縦弾性係数は変動しながらも増加した。衝撃圧縮試験では、0 : 100 の 300 時間後の試験片は、応力-ひずみ線図において、最大値を示した後、急激に低下した。試験後の試験片の観察から、どの混合比においても 300 時間後はぜい性破壊がみられ、デグラノボンの混合比が多いほど、その傾向は顕著であった。

最後に、研究を遂行するに際し、試料を提供していたノボン・ジャパン株式会社に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) T. Ke and X. Sun, "Physical properties of poly(lactic acid) and starch composites with various blending ratios", *Cereal Chemistry*, Vol. 77, No. 6, pp. 761-768 (2000).
- 2) T. Ke and X. Sun, "Effects of moisture content and heat treatment on the physical properties of starch and poly(lactic acid) blends", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 81, Issue 12, pp. 3069-3082 (2001).
- 3) D. Garlotta, W. Doane, R. Shogren, J. Lawton, J.L. Willett, "Mechanical and thermal properties of starch-filled poly(D,L-lactic acid)/poly(hydroxy ester ether) biodegradable blends", *Journal of applied polymer science*, Vol. 88, issue 7, pp. 1775-1786 (2003).
- 4) J.-F. Zhang and X. Sun, "Mechanical properties of poly(lactic acid)/starch composites compatibilized by maleic anhydride", *Biomacromolecules*, Vol. 5, No. 4, pp. 1446-1451 (2004).
- 5) E. Ataka and M. Uemura, "Biodegradable resin composition and method for producing the same", U.S. Pat.No. 7,846,991 B2 (2010).
- 6) M. Nishida, Y. Yutani, M. Uemura and E. Ataka, "Dynamic compressive properties of biodegradable polymer blend containing corn starch", *Proceedings of 19th DYMAT Technical Meeting*, (2010).
- 7) M. Nishida, Y. Yutani, M. Uemura and E. Ataka, "Influence of ultraviolet irradiation on mechanical properties of starch-filled PLA/PBAT blends", *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-10 (2012).
- 8) O. Koyashiki, "Degra-Novon", *Japan Plastics*, Vol. 52, No. 10, pp. 36-39 (2001).
- 9) O. Koyashiki, "Degradable Plastic additives Degra-Novon", *Converttech*, Vol. 32, No. 9, pp. 73-78 (2004).
- 10) M. Flieger, M. Kantorova, A. Prell, T. Rezanka and J. Votruba, "Biodegradable plastics from renewable sources", *Folia Microbiologica*, Vol. 48, No. 1, pp. 27-44 (2003).
- 11) E. Chiellini and R. Solaro, "Biodegradable polymers and plastics", pp. 185-189, *Proceedings of 7th World Conference on Biodegradable Polymers & Plastics* (2003).

- 12) G. M. Chapman and R. H. Downie, "Degradable synthetic polymeric compounds", JP.1996-509750 (1996).
- 13) Novon Japan Inc., Materials manual of Degra-Novon.
- 14) Sumitomo Chemical Co.,Ltd., Materials manual.
- 15) E.D.H. Davies and S.C. Hunter, "The dynamic compression testing of solids by the method of the split Hopkinson pressure bar", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 11, No. 3, pp. 155-179 (1963).
- 16) Suga Test Instruments Co.,Ltd, S80 Instructions manual.
- 17) G.T. Gray, III, "Classic split Hopkinson pressure bar testing", ASM Handbook Vol 8, Mechanical Testing and Evaluation, pp. 462-476, (2000).
- 18) W. Chen and B. Song, "Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications", (2010) Springer.
- 19) K. Nakai and T. Yokoyama, "Strain rate dependence of compressive stress-strain loops of several polymers", Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 2, No. 4, pp. 557-566, (2008).
- 20) Y. Izumi, M. Ogawa, S. Kato, J. Shiokawa, T. Shiba, "Manuduction of instrumental analysis" 2nd edition, pp. 1-23 (1996) Kagaku-Dojin.
- 21) T. Nishioka, "Introduction to polymer analysis", pp. 44-72 (2010) kodansya-scientific.