

「ポラス樹脂材料の衝撃挙動に関する研究」

慶應義塾大学理工学部

大宮正毅

1. 緒言

近年、生分解性を有する PLA（ポリ乳酸）が高分子材料として注目されている。従来の高分子材料は石油由来であるのに対し、PLA は植物のデンプンに由来している高分子材料であるため、植物のデンプンに含まれる炭素の由来は大気中の二酸化炭素であることから、カーボンニュートラルな材料と言われている。使用用途としては、医療用途から自動車関係や容器、梱包材などへと拡大している。標準的な PLA は弾性率が約 2-3GPa、引張強さが 50-70MP の脆い材料である。したがって、強い衝撃に耐えることができないため、PLA の用途が制限されてしまうことが問題点である。これを解決するために、今日まで PLA より柔軟な他の高分子材料をブレンドすることが行われてきている。

本研究では、ブレンド材として Poly butylene adipate-co-terephthalate(PBAT)を使用した。PBAT は高い生分解性を有し、弾性率と引張強さは PLA に比べはるかに劣るが、破断ひずみは約 710%でとても柔軟な材料である。また、PLA とのブレンドにおいて PLA 中に均等に分散するなどのデータがあることから、ブレンド材としての信頼性がある。従来の研究では、静的引張試験やシャルピー衝撃試験などによる力学的特性評価が行われてきたが、圧縮試験や動的応力下での力学的特性評価は行われていない。さらに、ポラス化を行うことで、材料の軽量化と衝撃吸収特性の向上させることができる。そこで本研究では、PLA/PBAT ブレンド材およびそのフォーム材の衝撃圧縮特性を評価することを目的とする。

今年度は、PLA/PBAT ブレンド材の静的圧縮試験と動的圧縮試験を行い、ポリ乳酸ブレンド材の圧縮特性評価を行った。また、数値解析により機械構造物やその構成部材の変形挙動を予測することが近年、求められている。そこで本研究では、Altair 社製 HyperWorks 内に含まれている汎用有限要素解析ソフト Radioss を用い、Johnson-Cook 型構成式を採用し、PLA 及びそのブレンド材のパラメータを実験より決定し、シミュレーション結果と実験結果の比較を行った。

2. 実験原理

2.1. 供試材

本研究では、PLA ナチュラル(以下 neatPLA)と PBAT 配合 PLA(以下 blendedPLA)を押出成形にて作製した。blendedPLA の PLA に対する PBAT の配合比は重量比で 60 : 40 である。

2.2. 静的圧縮試験

JIS K7181 を参考に試験を行った。実験条件は以下に示す 5 条件であり、試験は 2 回行った。

- (i) 試験片:直径 25 mm, 長さ 20 mm
強制変位速度:0.034 mm/s
- (ii) 試験片:直径 25 mm, 長さ 10 mm
強制変位速度:0.083 mm/s
- (iii) 試験片:直径 25 mm, 長さ 20 mm
強制変位速度:0.016 mm/s
- (iv) 試験片:直径 25 mm, 長さ 20 mm

- 強制変位速度:0.34 mm/s
(v) 試験片:直径 25 mm, 長さ 10 mm
強制変位速度:7.5 mm/s

2.3. 動的圧縮試験

動的圧縮試験はスプリット・ホプキンソン棒法を使用した。試験片サイズは直径 25 mm 長さ 10 mm, 入出力棒・打出し棒にはアルミ合金を使用した。実験条件は以下の 2 条件である。

- (i)エアガンの圧力:0.2 MPa, 打出し棒:150 mm
(ii)エアガンの圧力:0.2 MPa, 打出し棒:300 mm

2.4. 数値解析

数値解析は Altair 社製 HyperWorks 内で解析ソフト Radioss を用いた。構成式は Johnson-Cook の粘弾塑性構成式であり、以下に示す。

$$\sigma = \left(a + b \varepsilon_p^n \right) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad \dots (1)$$

ただし、 a は降伏応力、 ε_p は塑性ひずみ、 $\dot{\varepsilon}_0$ は参照ひずみ速度、 $\dot{\varepsilon}$ はひずみ速度、 b は硬化係数、 n は硬化指数、 c はひずみ速度係数である。 n, b, c は静的圧縮試験の結果から算出した。モデルは直径 25 mm, 長さ 10 mm でメッシュ数 4832, 節点数 1218 である。

3. 実験結果

3.1. 静的圧縮試験

静的圧縮試験により得られた実験条件(i)の応力-ひずみ線図を図 1 に、全サンプルの実験結果を表 1 に示す。まずヤング率について、実験条件(ii)と(v)を除いて neatPLA ではヤング率の変化はほとんどない。一方、blendedPLA ではヤング率の上昇が見られる。実験条件(ii)と(v)に関しては、試験片の細長さ比は 0.4 であり、その他の実験条件の試験片の細長さ比 0.8 の時に比べ、圧縮面との摩擦の影響が大きくなる。その結果、実際に試験片がうけた応力がデータより大きいため、ヤング率が低くなったと考えられる。

次に降伏応力について、PBAT を 40%加えることで neatPLA の 1/3 から 1/4 程度に低下している。また、明確な降伏点は消え、強制変位速度の上昇とともに降伏応力が上昇している。実験条件(i)と(iv)の両者の降伏応力の値から上昇度合を比較すると、neatPLA では 1.1 倍に上昇しており、blendedPLA では 1.3 倍に上昇している。そのため、blendedPLA の方が粘塑性効果が大きく表れている。

最大ひずみについて、neatPLA では降伏後に応力が低下から上昇へと転じた時点のひずみの値とした。blendedPLA では降伏し応力が最大となった後、応力が低下から上昇へと転じた時点のひずみの値とした。ただし、降伏後に応力の低下がみられないときはひび割れが発生した時点のひずみの値とした。結果を見比べると、PBAT を 40%加えることで neatPLA の 2 倍程度のひずみになっている。

吸収ひずみエネルギーについて、本研究では降伏点まで、および材料にひび割れが発生した時点までの 2 つの指標で評価した。降伏点まででは neatPLA のほうがエネルギーを多く吸収している。材料にひび割れが発生した時点までの吸収ひずみエネルギーについて、PBAT を 40%加えることで neatPLA の 10 倍程度と大きく上昇している。neatPLA は降伏点に達する前に内部でひび割れが生じるが、blendedPLA は延性が大きく最大ひずみに達する少し前に外部にひび割れが生じる。また、試験前後の試験片を見比べると、neatPLA では特に試験片の色に変化はないが、blendedPLA では黄色から白へと変化している。これはク

レージングにより白化したことを表しており、エネルギー吸収に有利である。つまり、neatPLA は塑性変形から割れるという破壊のメカニズムであり、blendedPLA は塑性変形からクレーズの形成を経て割れるという破壊のメカニズムである。また、応力-ひずみ線図からわかるように、blendedPLA は延性材料特有の応力-ひずみ線図の形状になっている。

3.2. 動的圧縮試験

動的圧縮試験と数値解析により得られた応力-ひずみ線図を図2と図3に示す。また、表2に動的圧縮試験で得られたヤング率と最大ひずみ速度を示す。ただしヤング率は、鋭く直線的に立ち上がるひずみ0.0001までの部分を最小二乗法により1次近似し、その傾きの値とした。

動的圧縮試験のヤング率について、neatPLA では実験条件(i)で1.6GPa、実験条件(ii)では2.7GPaとなり、blendedPLA では実験条件(i)で1.3GPa、実験条件(ii)では1.6GPaとなっており、ともにひずみ速度の上昇に伴い、ヤング率が上昇している。

数値解析との比較について、動的圧縮試験で得た応力-ひずみ線図と数値解析による応力-ひずみ線図は概ね一致している。数値解析による応力-ひずみ線図の方が応力値が高いのは、本来、試験片の出力棒側は自由端であるのに対し、解析の条件では1つの節点のみ完全拘束する必要があったため、自由端ではなくなったこと、動的圧縮試験において強制変位速度は徐々に増加するが、解析で与えた強制変位速度には、実験の強制変位速度の最大値を一定な強制変位速度として与えた2点が原因と考えられる。

3.3. 静的圧縮と衝撃圧縮による結果の比較

neatPLA と blendedPLA に共通して、ひずみ速度の上昇に伴い弾性率が上昇していることがわかる。弾性率の上昇の度合いに注目すると、blendedPLA の上昇の度合いが neatPLA に比べ大きいことから、PBAT を加えることで粘性が増加し、動的粘弾性特性がより大きく表れるようになったのだと考えられる。

4. 結言

- ・PLA は PBAT をブレンドすることで、ヤング率と降伏応力は低下するが、最大ひずみは2倍に、吸収ひずみエネルギーは10倍に増加する。
- ・neatPLA, blendedPLA ともにひずみ速度の上昇に伴い、ヤング率、降伏応力は増加する。
- ・blendedPLA ではクレージングによる白化が起こる。
- ・PLA は内部にひびが発生し、blendedPLA は側面にひびが生じる。
- ・構成式の硬化指数、硬化係数、ひずみ速度係数は neatPLA ではそれぞれ 0.44, 3.6, 0.10, blendedPLA ではそれぞれ 0.64, 5.4, 0.11 である。
- ・PBAT を加えると粘性が増加し、動的粘弾性特性及び動的粘塑性特性がより大きく表れる。

5. 次年度の計画

PLA/PBAT ブレンドのフォーム材を製作し、衝撃圧縮特性の評価実験を実施する。また、数値解析については、Johnson-Cook の粘弾塑性構成式では、軟化現象を再現できないため、軟化現象を考慮した構成式を採用し、ユーザーサブルーチンを用いて Radioss の解析に組み込む予定である。

6. 研究発表

- ・日本機械学会 M&M2009 材料力学カンファレンス、2009年7月24～26日、講演予定
- ・日本実験力学学会 2009年度年次講演会、2009年8月5～7日、講演予定

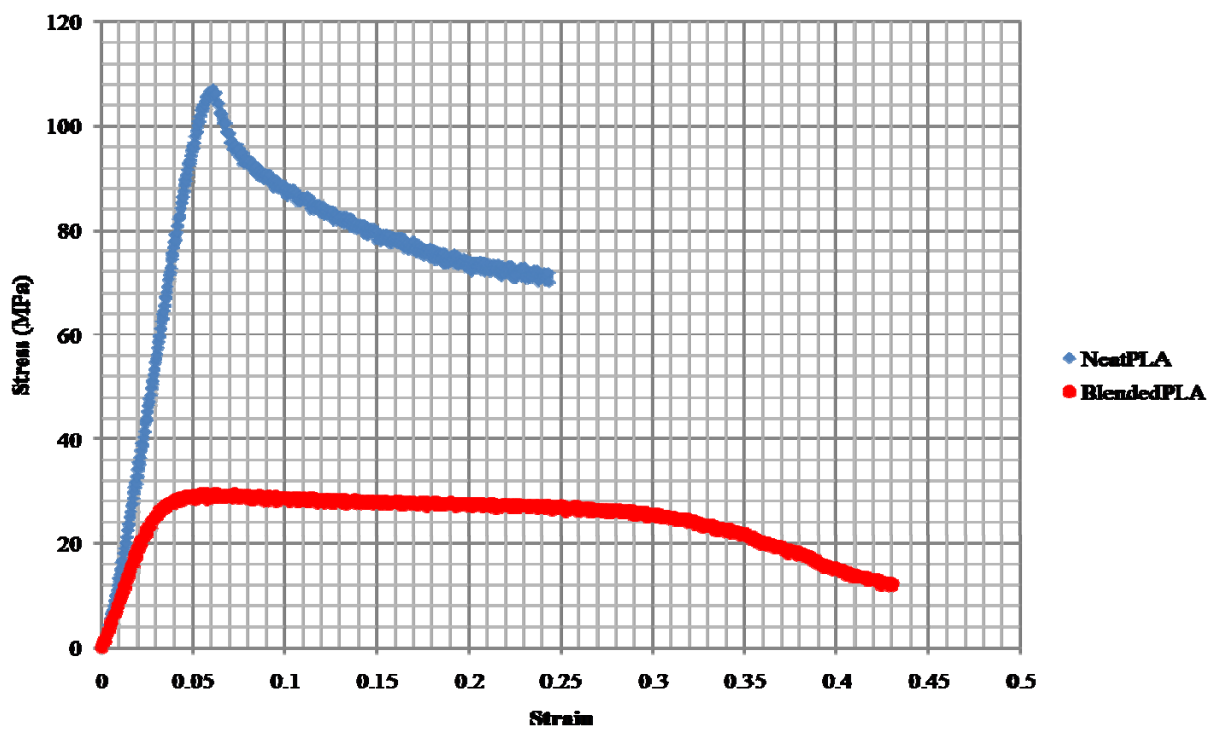


図 1. 静的圧縮試験の応力-ひずみ曲線

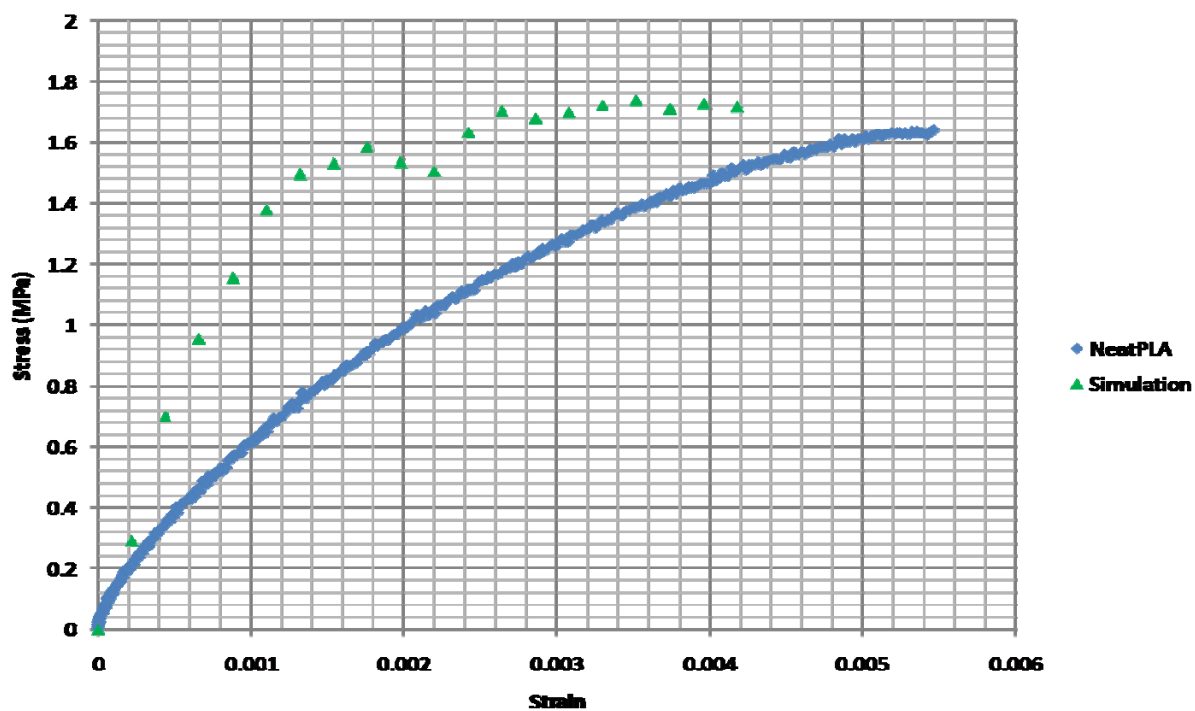


図 2. 動的圧縮試験と数値解析の応力-ひずみ曲線

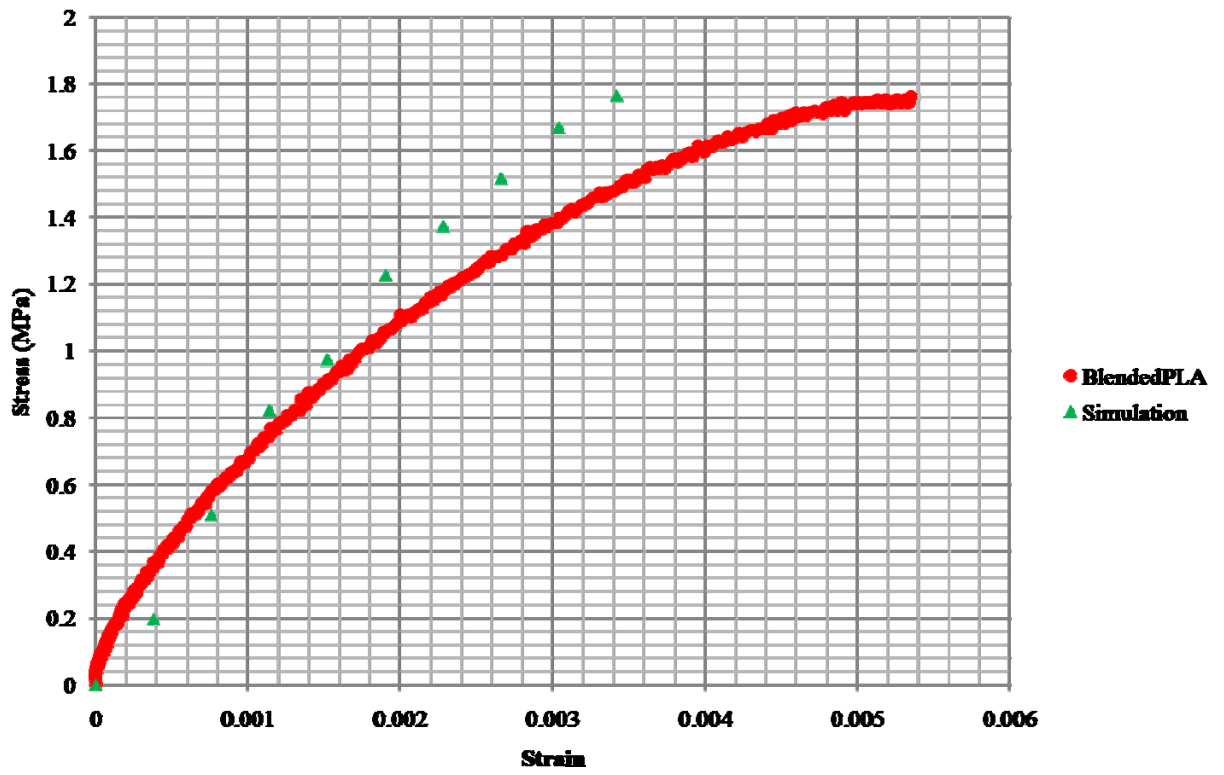


図 3. 動的圧縮試験と数値解析の応力-ひずみ曲線

表 1. 静的圧縮試験の結果

			NeatPLA		BlendedPLA	
			SampleNo.		SampleNo.	
Imposed velocity (mm/s)	Strain rate (1/s)		I	II	I	II
0.034	0.0017	Young's modulus (GPa)	2.1	2.0	0.83	0.83
		Yield stress (MPa)	107	108	28	28
		Strain energy at yielding point (MJ/m ³)	3.4	3.5	0.53	0.68
		Strain energy at crack initiation (MJ/m ³)	0.93	1.0	11	10
		Maximum strain	0.23	0.22	0.43	0.43
0.083	0.0083	Young's modulus (GPa)	1.2	1.4	0.74	0.75
		Yield stress (MPa)	114	118	31	31
		Strain energy at yielding point (MJ/m ³)	5.8	5.2	0.81	0.72
		Strain energy at crack initiation (MJ/m ³)	0.75	1.7	16	28
		Maximum strain	0.20	0.27	0.47	0.59
0.16	0.0083	Young's modulus (GPa)	1.8	1.8	0.85	0.81
		Yield stress (MPa)	118	119	32	33
		Strain energy at yielding point (MJ/m ³)	4.2	4.1	0.78	0.95
		Strain energy at crack initiation (MJ/m ³)	0.71	0.84	14	14
		Maximum strain	0.26	0.25	0.62	0.54
0.34	0.017	Young's modulus (GPa)	1.9	1.9	0.93	0.97
		Yield stress (MPa)	123	122	35	36
		Strain energy at yielding point (MJ/m ³)	4.5	4.4	0.75	1.1
		Strain energy at crack initiation (MJ/m ³)	0.73	2.0	13	13
		Maximum strain	0.26	0.21	0.57	0.62
7.5	0.75	Young's modulus (GPa)	1.3	1.2	0.65	0.60

表 2. 動的圧縮試験の結果

	Air gun pressure (MPa)	Strike bar length (mm)	Young's modulus (GPa)	Maximum strain rate (1/s)
NeatPLA	0.2	150	1.6	10
	0.2	300	2.7	20
BlendedPLA	0.2	150	1.3	12
	0.2	300	1.6	19