

再生可能資源を用いた環境調和型複合材料の創成及び評価

Creation and Evaluation of Green Composite Materials Using Reproducible Resources

東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻
安全評価工学研究室 修士二年 26291 森本 晋介
指導教官 高橋 淳 助教授

概要

現在、天然繊維を用いた複合材料の研究が世に行われている。用いる繊維としては、ケナフや絹、竹、オガクズ等々である。一部は世に出てきているが、研究中の物も含め非構造部材ばかりである。本研究では圧縮や曲げなど、構造物に要求される性能の観点から評価を行い、どのような既存構造材料の代替に可能性があるのかを考察する。

1. 研究の背景

産業革命以降、製造段階で多くのエネルギーを消費する基礎素材による人工物が世の中に広く出回るようになり、現在、日本のエネルギー消費の約 30%は基礎素材の製造に使用されている。現存する人工物の構成素材は長年の淘汰を経たコストと性能のバランスが取れたものであるが、低環境負荷という性能を同時に考慮すべき場合には、別の選択肢がありうる。その一例として、再生可能資源である植物から得られる繊維と樹脂を用いて、汎用構造材料の代替となるような複合材料を創成することができれば、日本のひいては世界の環境エネルギー問題の解決に寄与できる可能性がある。

2. 本研究の構成

本研究は天然繊維と植物由来のプラスチックという共に再生可能な資源を用いて環境調和型複合材料を創成、評価することが主たる目的である。よって、実験的研究と社会受容性評価と言う二面を持つことになる。

本研究において用いる天然繊維としてはケナフ繊維を選んだ。ケナフ繊維は植物性繊維である為成長段階で二酸化炭素を吸収してくれること、しかも二酸化炭素吸収速度は植物中最高レベルであること、竹に比べて繊維が取り出しやすいこと、環境適応性が強いのであらゆる場所で栽培可能であること、繊維としての強度が植物繊維の中では高い部類に入ることなどがケナフ繊維を選んだ理由である。

まずケナフ繊維と不飽和ポリエステル樹脂で複合材料を作製し、どれ程の強度を出すことができるのかを確認した。不飽和ポリエステル樹脂を選んだ理由は複合材料のマトリックスとして実績があり、もっとも汎用性の高いプラスチックだからである。次いで、植物由来樹脂を用いて複合材料を作製し、不飽和ポリエステル樹脂の場合と比べてどれ程の強度を出すことができるのかを調べた。用いた植物由来樹脂はポリ乳酸樹脂である。ポリ乳酸樹脂を選んだ理由は、植物由来であることに加え生分解性をも有するプラスチックのうちで最も高い力学的性能を期待できるからである。

また、ケナフ繊維と植物由来樹脂を用いて複合材料を創成するだけでなく、それを評価することも本研究の大きな柱である。具体的な手法としては、創成した複合材料でできた製品について LCA を実施し二酸化炭素排出量について環境負荷評価を行った。次に二酸化炭素排出量の削減効果を消費者

に提示し、購買意欲がどれくらいあるかを調査し、費用も考慮に入れて社会に受け入れられるか否かを検討した。次に環境効果を消費者に提示し、購買意欲がどれくらいあるかを調査し、費用も考慮に入れて社会に受け入れられるか否かを検討した。

3. 実験

3-1 ケナフ繊維束引張試験 ケナフ繊維を約 80 本撚ったケナフ繊維束(平均直径 0.50mm)を、水分の影響をなくす為に 100 で 24 時間乾燥させて用いた。長さ約 185mm の試験片を作製し、引張試験を行った。試験機は米倉製作所製電子式万能試験機を用いた。20kgf のロードセルを用い、クロスヘッドスピードは 3mm/min である。

試験結果は破断荷重の平均値が 30.5N (変動係数 19%)、応力に直すと 153MPa であった。なお、ここでいう応力とは引張力がかかっていない状態のケナフ繊維束の断面積で破断荷重を除いた公称応力である。代表的な応力-変位線図を図 1 に示す。変位はクロスヘッド変位を用いている。図 1 において 70MPa 付近にて線図がゆがんでいるがこれは治具の影響である。また、元来繊維を撚ってある為応力-変位線図の立ち上がり部分の傾きが曲線を描いている。直線を描くようになってからの見掛けの弾性率を求めると 5.7MPa と求めた。ケナフ繊維束は縄の様にケナフ繊維を撚っただけの疑似連続繊維である。丁度ロープを引っ張ったときの様に変位が大きくなってしまふ為、この値はケナフ繊維自体の弾性率(18.2GPa)と比べると低い値となっている。

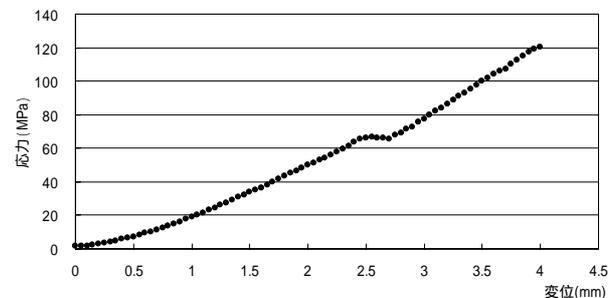


図1 ケナフ繊維束引張試験結果(応力-変位線図)

3-2 ケナフ繊維束強化不飽和ポリエステル樹脂試験
複合材料のマトリックスとして実績のある不飽和ポリエス

表1 ケナフ繊維束強化UP引張試験結果

		破断応力	弾性率	破断歪
		MPa	GPa	%
加圧	平均	174.7	16.8	1.6
	変動係数	5.1	24.0	4.5
非加圧	平均	148.8	11.1	1.7
	変動係数	5.9	13.1	7.7
UPのみ	平均	62.0	3.8	2.3
	変動係数	7.7	3.1	18.1

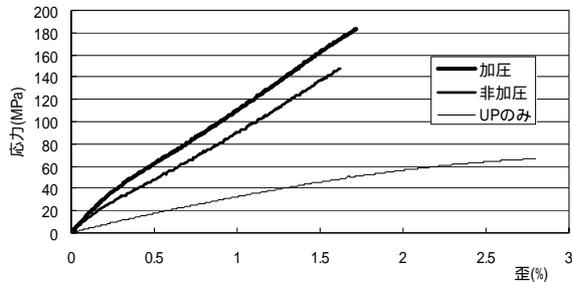


図2 引張試験の代表的な応力-歪線図

テル樹脂とケナフ繊維束を用いて複合材料を作製し引張試験及び圧縮試験を行った。

3-2-1 試験片母体作成方法 厚さ 0.8mm のアルミ板にケナフ繊維束をできるだけ真っ直ぐになる様に 546 回巻き付けたものと不飽和ポリエステル樹脂を内寸が 200mm × 130mm × 5mm の金型に入れ 3.8MPa で加圧成型した。546 回巻き付け理由は繊維の体積含有率を 40%にする為である。樹脂は昭和 高分子製リゴラック E-1301BQTN を用いた。試験片を室温にて固化させた後、40 で 16 時間の後硬化を加えた。後硬化の温度及び時間は ISO-1268(FRP 試験片板の作り方)に準拠した。

3-2-2 引張試験法及び結果 ダイヤモンドカッタを用いて試験片母体から繊維方向に沿って幅 6mm で切り出した。チャック部での破壊が起きないように試験片の両端に紙ヤスリを接着し、試験片中央部には歪ゲージを接着して試験片とした。用いた歪ゲージは東京測器研究所製の FLA-10-23 (ゲージファクタ: 2.14 ± 1%) である。試験機は島津製作所製電子式万能試験機を用いた。10t のロードセルを用い、クロスヘッドスピードは 1mm/min である。

結果を表 1 及び図 2 に示す。図 2 は各条件における代表的な応力-歪線図である。図表中における UP とは不飽和ポリエステル樹脂 (Unsaturated Polyester Resin) の略である。

3-2-3 圧縮試験法及び結果 ダイヤモンドカッタを用いて試験片母体から繊維方向に 48mm、幅 15mm の試験片を切り出した。試験片の寸法については JIS K 7076 炭素繊維強化プラスチックの面内圧縮試験方法を参考にした。図 3 の様な圧縮試験治具を用いた。切り出した試験片を治具にセットするとゲージ部の長さは 8mm となる。試験片ゲージ部中央に歪ゲージを接着した。用いた歪ゲージは東京測器研究所製の FCA-3-23、ゲージファクタは 2.14 ± 1% であった。試験機は島津製作所製電子式万能試験機 DCS-10T を用いた。2t のロードセルを用い、クロスヘッドスピードは 0.5mm/min である。

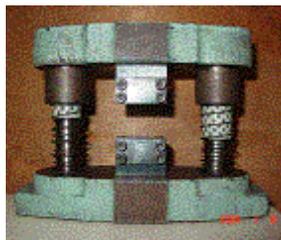


図3 圧縮試験治具

表2 ケナフ繊維束強化UP圧縮試験結果

		破断応力	弾性率
		MPa	GPa
ケナフ-UP	平均	89.8	14.5
	変動係数	1.6	2.7
UPのみ	平均	109.9	3.4
	変動係数	2.0	2.7

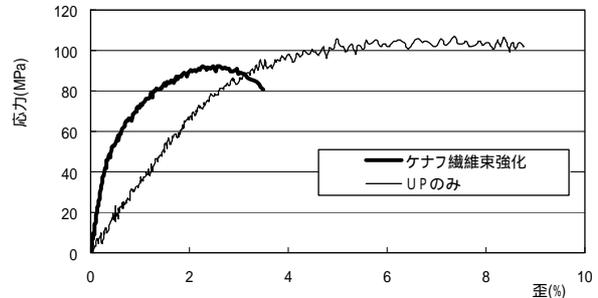


図4 圧縮試験の代表的な応力-歪線図

結果を表 2 及び図 4 に示す。図 4 は各条件における代表的な応力-歪線図である。

3-3 ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂試験 植物由来で生分解性を有するポリ乳酸樹脂とケナフ繊維束を用いて複合材料を作製した。再生可能資源を用いた環境調和型複合材料である。引張試験及び圧縮試験を行った。

3-3-1 ポリ乳酸樹脂板作成方法 用いたポリ乳酸樹脂はペレット状の三井化学製レイシア H-100 である。ポリ乳酸樹脂は植物由来の生分解性を有し、熱可塑性で透明性に優れた結晶性の樹脂である。融点は 164 、ガラス転移温度は 57 位であると言われ、メルトフローレートは 8g/10min(190 、 2.16kg) である。ポリ乳酸樹脂板の成型方法を以下に説明する。ポリ乳酸樹脂を内寸が 200mm × 130mm × 1mm の金型に入れ金型ごと真空引きにかけ、十分に空気を抜いてから 185 (加熱成型器設定温度) 3.8MPa で加熱・加圧成型する。用いた加熱・加圧成型器は東洋精機製作所製ミニテストプレス MP-WCH である。冷却方法は水冷である。得られた厚さ 1mm のポリ乳酸樹脂板をプリプレグとして用いて試験片母体を作製した。

3-3-2 試験片母体作成方法 厚さ 1mm のポリ乳酸樹脂板にケナフ繊維束を 390 回巻き付ける。ここで 390 回巻き付け理由は繊維の体積含有率を 40%にする為である。内寸が 200mm × 130mm × 3mm の金型に下からポリ乳酸樹脂板・ケナフ繊維束を巻き付けたもの・ポリ乳酸樹脂板となる様にいった。金型ごと真空引きにかけ、十分に空気を抜いてから 185 、 3.8MPa で加熱・加圧成型した。

複合材料を構成する樹脂は、プリプレグ成型時と複合材料成型時の合計二度にわたり加熱及び加圧されることになる。一度しか加熱・加圧しない場合と二度加熱・加圧した場合は樹脂の性能に影響がでる可能性があるため、ポリ乳酸樹脂だけの試験片については、ペレットから直接成型したものとプリプレグから成型したりサイクルポリ乳酸樹脂の二通りで試験した。

3-3-3 引張試験法及び結果 3-2-2 ケナフ繊維束強化不飽和ポリエステル樹脂の引張試験法に準ずる。ただし、試

表3 ケナフ繊維束強化PLA引張試験結果

		破断応力	弾性率	破断歪
		MPa	GPa	%
ケナフ-PLA	平均	151.4	16.6	1.1
	変動係数	3.1	2.8	3.3
PLA	平均	58.1	4.2	-
	変動係数	0.3	3.6	-
リサイクルPLA	平均	55.3	3.6	-
	変動係数	0.8	3.2	-

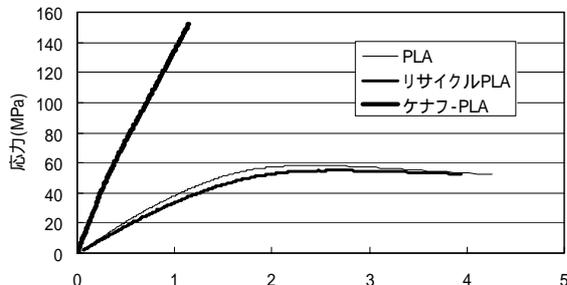


図5 引張試験の代表的な応力 - 歪線図

験片の幅は JIS K 7073 炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法を参考にし、幅 15mm とした。

結果を表 3 及び図 5 に示す。図 5 は各条件における代表的な応力 - 歪線図である。図表中における PLA とはポリ乳酸樹脂 (Poly Lactic Acid Resin) の略である。

3-3-4 圧縮試験法及び結果 3-2-3 ケナフ繊維束強化不飽和ポリエステル樹脂の圧縮試験法に準ずる。

結果を表 4 及び図 6 に示す。図 6 は各条件における代表的な応力 - 歪線図である。

3-4 考察 不飽和ポリエステル樹脂にケナフ繊維束を入れると引張では強度及び剛性に、圧縮では剛性について補強効果があることが確認できた。ポリ乳酸樹脂の場合は引張と圧縮の強度及び剛性全てについて補強効果を確認できた。樹脂に対する強化率は強度よりも剛性の方がはるかに大きかった。

ケナフ繊維束強化不飽和ポリエステル樹脂とケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂を比較すると引張については不飽和ポリエステル樹脂の方が、圧縮についてはポリ乳酸樹脂の方が優れていたがケナフ繊維束強化不飽和ポリエステル樹脂の圧縮強度がかなり小さいので、ケナフ繊維束を強化材として用いて複合材料を作製する場合、不飽和ポリエステル樹脂よりもポリ乳酸樹脂の方が総合的に観ると強い複合材料を作れることがわかった。また、ポリ乳酸樹脂についてであるが、リサイクルすることで力学的性能がやや落ちることがわかった。複合材料を作製するときに樹脂を熔融させる回数を一回に減らすことができれば更なる性能向上が見込まれる。

表5 強化率

使用樹脂名	強化率		強度/剛性	
	強度	剛性		
UP	引張	282%	445%	0.63
	圧縮	82%	425%	0.19
PLA	引張	272%	450%	0.61
	圧縮	158%	442%	0.36

表6 他の素材との比較

	密度	強度	剛性	比強度	比剛性
	Mg/m ³	MPa	GPa	10 ⁴ 3m	10 ⁴ 5m
ケナフ-PLA	1.18	151	16.6	13.14	14.43
GFRP(平織)	1.71	310	22.1	18.53	13.25
炭素鋼(S40C)	7.86	588	207.0	7.64	26.88

表4 ケナフ繊維束強化PLA圧縮試験結果

		破断応力	弾性率
		MPa	GPa
ケナフ-PLA	平均	140.1	15.3
	変動係数	2.5	6.8
PLA	平均	92.8	4.0
	変動係数	1.7	2.4
リサイクルPLA	平均	88.5	3.5
	変動係数	0.8	6.3

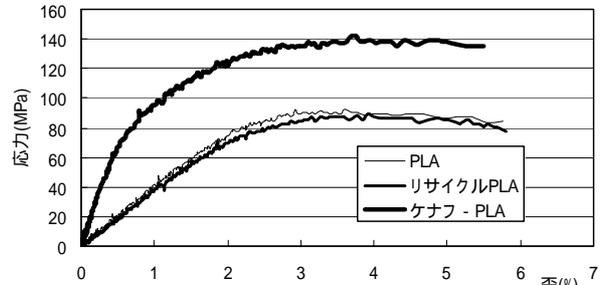


図6 圧縮試験の代表的な応力 - 歪線図

ケナフ繊維束を入れたことでどれだけ強度及び剛性が向上したか及び強度の強化率と剛性の強化率の比を表 5 に示す。これを観ると、ケナフ繊維束は強度よりも剛性、圧縮よりも引張において補強効果を発揮することがわかる。

ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂を GFRP (平織、 $V_f=42.1\%$) と炭素鋼 (S40C) 比較する。強度・剛性では両者より劣るが、比強度・比剛性で比較するとどちらか一方では勝っていることがわかる。ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂の使用量や形状・構造を工夫すれば十分に既存の構造部材の代替素材となり得ることがわかる (表 6)。

引張及び圧縮試験結果をまとめて図 7 に示す。樹脂のみの線図はポリ乳酸樹脂の線図のみを代表として載せた。零点で圧縮試験結果から引張試験結果に移行するのだが傾きがなめらかに連続していることが観察される。

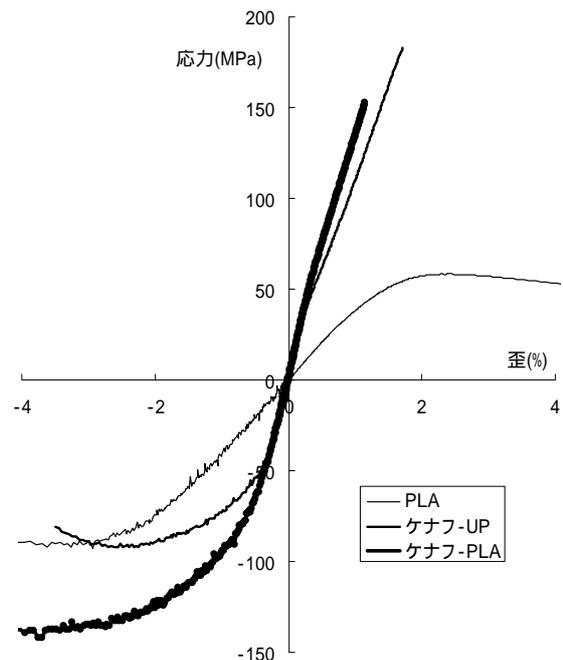


図7 引張試験及び圧縮試験結果総括

4. 解析

有限要素法を用いてケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂で作られたと仮定した三次元格子構造体を解析した。

4-1 解析に用いたモデルについて 図8の様な形状をした IsoTruss 構造体を用いた。縦軸により作られている正六角形の外接円の直径は 60mm、全長 450mm(9 スパン)である。縦軸及び螺旋軸は直径 2mm の円形断面とした。下端は完全固定、ポアソン比は 0.3 とした。

用いた材料特性は実験結果から引張、圧縮それぞれについて多直線近似とした。用いた値は次の通りである。

引張 = 0 ~ 60MPa の場合 $E = 16.2\text{GPa}$
 = 60 ~ 147MPa の場合 $E = 11.7\text{GPa}$
 147MPa で破断

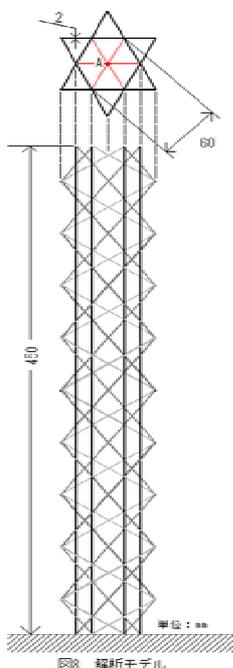
圧縮 = 0 ~ 40MPa の場合 $E = 16.2\text{GPa}$
 = 40 ~ 70MPa の場合 $E = 12.0\text{GPa}$
 = 70 ~ 97MPa の場合 $E = 5.4\text{GPa}$
 = 97 ~ 127MPa の場合 $E = 3.0\text{GPa}$
 = 127 ~ 139MPa の場合 $E = 0.62\text{GPa}$
 139MPa で破断

4-2 解析方法及び結果 圧縮、曲げ、ねじりについて変位制御で解析した。ソルバとしては MARC を使用した。

解析結果は次の通りであった。

圧縮 : 1239N
 曲げ : 51.3N
 ねじり : 57.7Nm

4-3 考察 解析に用いた IsoTruss 構造体の重さを求めると 0.49N であった。同重量・同全長の炭素鋼製中実円柱と比較すると最大圧縮荷重では 31.0 倍、最大曲げ荷重では 5.2 倍の荷重に耐えられることがわかった。炭素鋼製柱と比べて、曲げよりも圧縮に強い構造であることがわかったので、圧縮強度がより求められる部材に用いる方が有効であることがわかる。



5. 社会受容性評価

事務用机を例に取り、ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂製の場合と従来製品である鉄製の場合について、二酸化炭素についてのみ LCA を実施した。また、その結果を基にアンケートを行い、支払意志額を調査した。

5-1 LCA 結果 ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂製事務用機の製造に関する二酸化炭素排出量は一台あたり 52.2kg であった。従来製品である鉄製事務用機の製造に関する二酸化炭素排出量は一台あたり 161.2kg であったので、ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂製の方が鉄製よりも環境調和型であることがわかった。

5-2 支払い意志額調査 ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂製のボールペン(設定した従来製品の価格: 150 円)、机(同: 1万円)、PC(同: 15万円)、ハンガ(同: 500円)の4種について、いくらなら購入するかを調査した。同時に環境

問題に関する知識についても調査し、知識の有無に応じて4層にサンプルを分けた。全体の平均値と最も知識を有している層の平均値を表7に示す。

表7 平均回答価格

	全体 (円)	対 従来価格	最も知識の ある層(円)	対 従来価格
ボールペン	160	106.9%	165	109.7%
机	10,399	104.0%	11,192	111.9%
PC	145,977	97.3%	150,898	100.6%
ハンガ	472	94.4%	506	101.2%

5-3 考察 全体として、環境への関心は高いが、己の可処分所得を減らしてまでは環境に良い製品を購入したいとは思わないと言う結果となった。市場原理だけが突出して強く働く現在の社会ではまだ受け入れられないであろう。しかしながら、環境問題の知識を最も有している層の回答価格を観ると全体のそれより上回っていること事がわかる。広く社会への受容性はまだないが、一部有志企業・市民の間では確実に受け入れられるものであることがわかった。

6. まとめ

本研究では再生可能資源であるポリ乳酸樹脂とケナフ繊維を用いて複合材料を創成した。以下に得られた主要な結論と今後の課題をまとめる。

複合材料用の熱硬化性樹脂として最も汎用性のある不飽和ポリエステルを用いて、ケナフ繊維束の補強効果の確認を試みたところ、引張については強度と剛性で大幅に向上することが確認できたが、圧縮については剛性だけが向上し、強度に関する補強効果が確認できなかった。

ケナフ繊維束とポリ乳酸樹脂を用いて複合材料を作製したところ、引張と圧縮の両方で強度と剛性に関する補強効果が確認できた。

ポリ乳酸樹脂の特性に及ぼす熱履歴の影響を調べた所、ポリ乳酸樹脂はリサイクルすることで力学的特性が低下すること、特に引張よりも圧縮において機能低下が大きいことがわかった。

ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂を用いて三次元格子構造体を作製するとした場合、同重量、同全長の炭素鋼製円柱よりも圧縮・曲げ共に(特に圧縮において)勝ることがわかった。

ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂製事務用机で LCA を実施した結果、従来の鉄製事務用机に比べて二酸化炭素排出量は約 30%程度であり、環境調和型複合材料と言えることが示された。

コストの面で課題は残るものの、再生可能資源由来のケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂は低環境負荷で高比強度・高比剛性な素材であることが確認された。また、三次元格子構造物にして複合材料の異方性を有効に活用することで、構造部材にも利用できる可能性が示された。即ち、これまで力学的性質が問われない部分でしか導入されていなかった再生可能資源が、より広範囲の人工物の代替として利用可能であり、またそれらの軽量化にも役立つことが示されたことになる。よってこのことから、基礎素材製造部門における大幅な省エネルギーという本論文における大いなる目的に向かっての十分な足がかりを得たと言える。