

■ 天然繊維を用いた環境に優しいFRP

5. 天然繊維を用いたFRP（LCA・社会受容性）

高橋 淳*

1. はじめに

ゴミ処理場の逼迫すなわち地域環境問題の視点から生分解性プラスチックスが注目されて久しい^{1) - 3)}が、地球環境問題の立場からはカーボンニュートラルな植物由来のプラスチックスであることのほうが重要である。ただし、植物由來のプラスチックス単体では耐熱性や強度・耐久性の制約から代替可能な応用範囲が限定されるため、繊維強化が考えられるのは必然のことであろう。

本稿では、植物由來プラスチックスの強化繊維としてもカーボンニュートラルな植物由來の繊維を用いた複合材料をグリーンコンポジットと呼び、その環境問題への寄与度について考察すると共に、社会に受け入れられるための条件について検討した結果⁴⁾を紹介する。

2. 地球環境問題における グリーンコンポジットの位置付け

図1は世界の部門別エネルギー消費割合であり、運輸部門はほとんど石油のみに依存しており、輸送機器の軽量化が世界的な省エネルギーに効果的であることがわかるが、本稿では産業部門における石油と石炭の消費量に注目する。すなわち、図2は我が国の産業部門におけるエネルギー消費量の部門別内訳であり、基礎素材の製造に多くのエネルギー源が消費されていることがわかる。

中でも、鉄鉱石を還元するためにコークスを用いざるを得ない鉄鋼業と、プラスチックの原料として原油を用いざるを得ない化学工業に関しては、OECD諸国では廃棄物や既存人工物による高炉還元やマテリアルリサイクルによって化石資源を節約することも可能で

あるが、非OECD諸国では新規製造のための化石燃料の使用はやはり免れない。日本の2001年度のデータでは、鉄鋼業と化学工業の総エネルギー使用量はそれぞれ産業部門の24%、30%であるが、化石資源だけでもエネルギー換算でそれぞれ産業部門の18%、24%を消費していることからも推定できるように、この2分野

World	Population	Total Primary Energy Supply	Total Final Energy Consumption
1973	3890 million	6152 Mtoe	4606 Mtoe
2003	6268 million	10723 Mtoe	7287 Mtoe

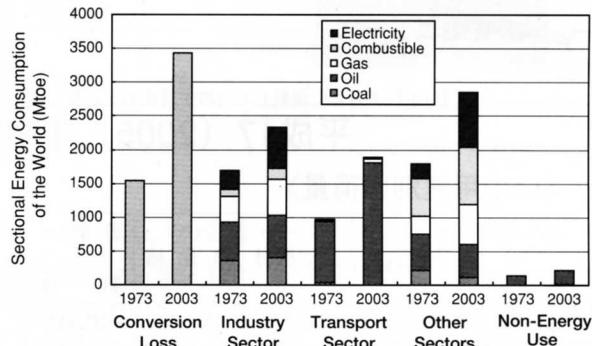


図1 エネルギー源別に見た世界の部門別エネルギー消費量
(IEA統計等をもとに筆者ら作成)

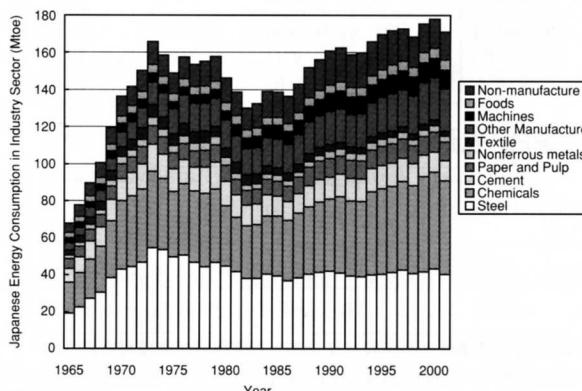


図2 日本の産業部門における最終エネルギー消費量の推移と内訳

*東京大学 大学院工学系研究科 環境海洋工学専攻

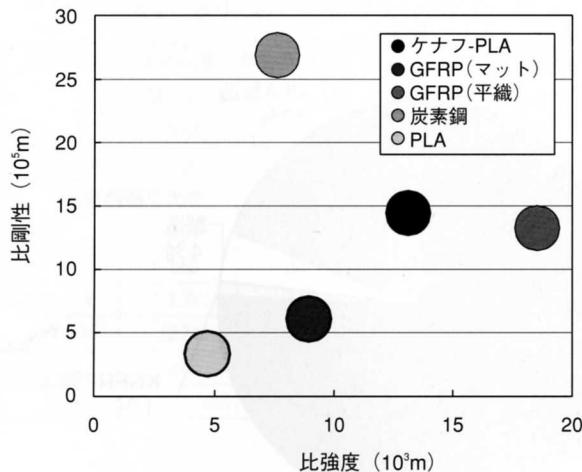


図3 基礎素材の比強度と比剛性の比較

(すなわち金属の還元とプラスチックスの製造という基礎素材分野)における非OECD諸国の化石燃料の使用は通常の省エネルギー技術では削減が困難と考えられる。

このような中、植物由来のいわゆるグリーンプラスチックスは、基礎素材のうちの化石資源由来のプラスチックスの一部を代替することで上記の問題を解決する手段として期待されているが、代替範囲が狭いため、化石資源由来のプラスチックスとのブレンドやフィラー添加により特性を向上させて代替範囲を広げるのが今後のトレンドと考えられる。以下、本稿では、このような取り組みのポテンシャルを量るために、まずはグリーンコンポジットによる基礎素材の代替の効果を検討した結果について紹介する。

3. ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂の持続可能性

本検討には V_f （繊維体積含有率）40%のケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂（以下KNFRPと略記）を用いた。ケナフは環境適応性の高い一年生の植物で成長段階での二酸化炭素吸収速度が速く、繊維にした時に高強度である。ポリ乳酸（PLA）はデンプンを原料とし、生分解性を有する植物由来樹脂である。

まず図3はKNFRPの比強度・比剛性を炭素鋼ならびにガラス繊維強化不飽和ポリエステル樹脂（チョップドストランドマット $V_f=19\%$ 、平織 $V_f=42\%$ ）と比べたものである。KNFRPの比強度・比剛性は他の素材の中間辺りにあり、 V_f や形状の工夫次第で他の素材の代替となり得ることがわかる。

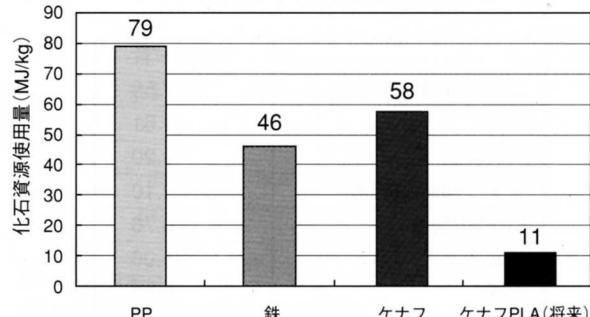


図4 既存素材との化石資源使用量の比較

以下本章では、KNFRPが真に持続可能な素材なのかについて、ライフサイクルアセスメント（LCA）の手法により、①化石資源使用量、②CO₂排出量、③供給持続性、④廃棄処理の4点から検討した。なお複合材料のLCAの特殊性や注意点に関しては、拙稿⁵⁾に詳しく記述したので参照されたい。

3.1 化石資源使用量

図4はKNFRPと既存素材の原料調達から部品製造までの単位重量あたりの化石資源消費量を比較したもの^{6)~8)}であり、KNFRPについては現状値と将来予測値⁹⁾を示してある。すなわち、現状ではKNFRP製品は鉄鋼製品よりも化石資源消費量が多いが、これはKNFRP製品の化石資源消費の大半がPLA製造時の電力消費によるためであり、PLA製造世界最大手のカーギル・ダウ社は製造工程の電力を風力発電で賄う計画を発表している。これに対して、鉄は還元のためにコークスを、PP（ポリプロピレン）は原料にナフサを消費するため枯渇性資源消費量の大幅な削減は望めない。

3.2 二酸化炭素排出量

KNFRPで重さ5kg（うちKNFRP4kg）の事務用机一台を製造した際のLCAを行うことで、KNFRPで鉄鋼を代替したときのCO₂削減効果について比較を行った（図5、6）。比較の対象は①現在の鉄鋼製の机を生産した場合、②PLA製造に既存の電力系統を使用し、製品製造（組立）の際に既存の機械製造方法¹⁰⁾を用いた場合（図6中の仮定なしケース）、③PLA製造の電力は既存の電力系統を用い、製品製造を大規模量産化した場合（図6中の組立仮定ケース）、④PLA製

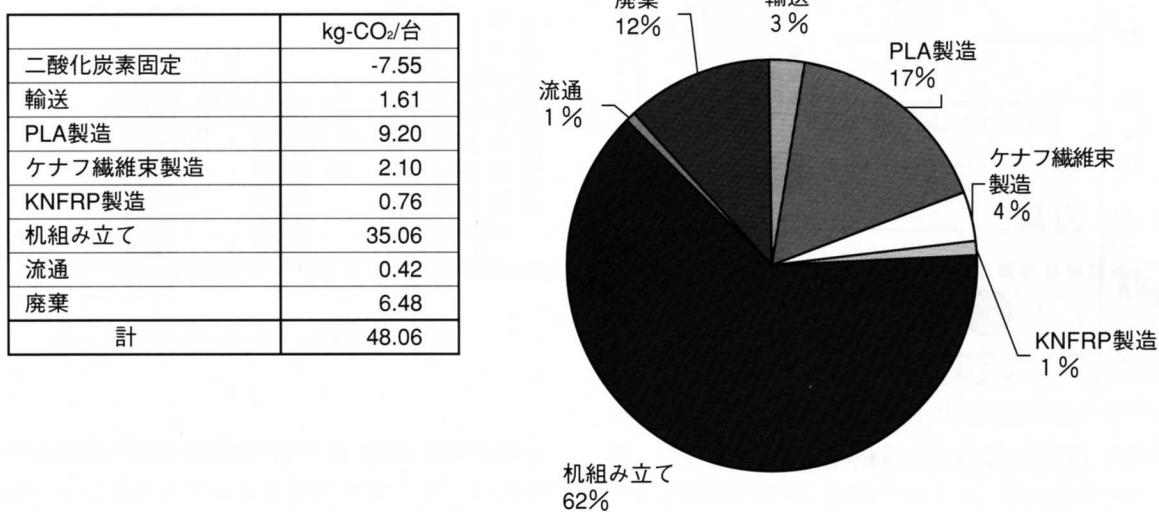


図5 ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂製の机のLCA結果

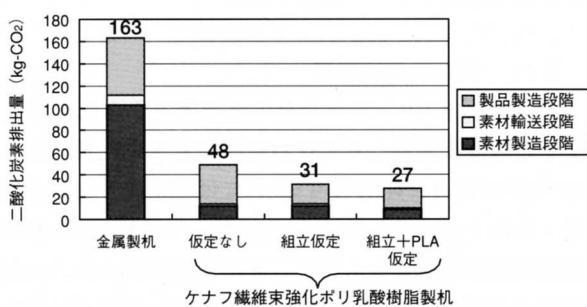


図6 ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂製の机と金属製机の環境負荷比較

造の電力を風力発電とし、製品製造も大規模化を行った場合（図6中の組立+PLA仮定ケース）である。

次に、KNFRPが普及した場合の環境効果を測るために、国内普通鉄鋼材年間生産量の1割（800万t）をKNFRPで代替した場合のCO₂削減効果を試算した。比強度はKNFRP：鉄鋼=1：0.6、比剛性はKNFRP：鉄鋼=1：1.8である（図3）から、鉄鋼800万tを代替するためには、強度を同等とした場合にはKNFRPが必要となることになり、それぞれの場合のCO₂排出量は表1のようになる。すなわち、現在の技術でのKNFRPを用いた場合のCO₂削減効果は1.6~16Mtであり、PLA製造に風力発電を用いたときのCO₂削減効果は14~21Mtとなる。これは、2000年の日本のCO₂排出

表1 二酸化炭素排出量の削減ポテンシャル

	steel	same strength		same rigidity	
		present	future	present	future
Production (Mt)	8.0		4.8		14.4
CO ₂ emission (kg/kg)	3.0	1.53	0.66	1.53	0.66
CO ₂ emission (Mt)	23.6	7.3	3.2	22	9.5
Reduction (Mt)	0	-16.3	-20.4	-1.6	-14.1

量の約1.2~1.7%に相当する。

以上の比較から、鉄鋼製製品のうち非強度用途に用いられるものの一部をKNFRPで代替することでも、非常に大きなCO₂削減効果があることがわかる。

3.3 供給持続性

PLAは植物から得られる糖質を乳酸発酵させることで製造され、可食部を生産するときに同時に作り出される残渣からも糖質は抽出できる。よって表2に示されるように、現在世界で発生しているトウモロコシと米の残渣から、理論上世界のプラスチック生産量約1億5千万tの2.5倍以上のPLAを製造することが可能である。また、生ゴミから乳酸を生産した例もあるため、PLAは供給持続性のある素材と言える。ケナフについても同様のことが言える。

表2 ポリ乳酸の供給ポテンシャル

植物資源	世界収量 億トン/年	糖質理論収率 %	糖質換算量 億トン/年	ポリ乳酸 億トン/年
小麦	5.83	60	3.50	2.38
トウモロコシ	6.00	60	3.60	2.45
米	5.96	60	3.58	2.43
馬鈴薯	2.94	15	0.44	0.30
キヤッサバ	1.68	20	0.34	0.23
サツマイモ	1.35	25	0.34	0.23
サトウキビ	12.74	15	1.91	1.30
ビート	2.63	15	0.39	0.27
合計	39.1		14.1	9.58

表3 消費者の支払い意志額調査結果

(円 (% : 基準価格に対する割合))			
	基準価格	全体平均回答価格	環境に知識のある層の 平均回答価格
ボールペン	150	160 (107%)	165 (110%)
机	10,000	10,399 (104%)	11,192 (112%)
PC	150,000	145,977 (97%)	15,898 (101%)
ハンガー	500	472 (94%)	506 (101%)

調査地域：日本全国

調査対象：購買能力のある18才以上の男女

サンプル数：紙面によるアンケート300、インターネット285

抽出方法：連絡の取れる者で、調査対象に該当するものの中から無作為に抽出

3.4 廃棄処理

PLAは生分解性樹脂のため、コンポスト化すれば廃棄物処理場を逼迫させない。また、焼却処理ないし熱回収した場合も、排出するCO₂は元来大気中にあったものなので、ライフサイクルを通しては大気中のCO₂を増加させることにはならないカーボンニュートラルな素材である。よって、KNFRPは廃棄処理時に問題は生じないと見えよう。

4. ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂の消費者受容性

以上で、KNFRPは既存の素材に匹敵する比強度・比剛性を持ち、世界的にも大きな省エネルギーポテンシャルを有しており、かつ持続可能性のある素材であることを示してきた。以下、本章ではこのKNFRPの普及の条件¹¹⁾について考察する。

4.1 支払意志額調査

KNFRP製品を4種（ボールペン、机、PC、ハンガー）挙げ、比較となる従来製品の価格も提示した上で、いくらならばKNFRP製品を購入するかを585人にアンケート調査した。アンケートは紙面により300件、インターネットホームページにより285件を採取し、支払い意志額と同時に環境知識についても調査して、知識の量に応じて4層にサンプルを分けた。結果は表3に示されるとおり、回答価格は知識のある層ほど高い結果となった。しかし、全体平均としては従来価格比で約94～107%の価格となり、価格が従来製品とはほぼ同等でなければ環境調和型製品の需要は少ないことがわかった。

4.2 環境ラベルタイプⅢの有効性に関する調査

4.1項の調査時に、3.2項の机のLCA結果を製品環境情報として提示する班としない班に分け回答価格の変化を調査したところ、LCA結果を提示した班はしなかった班に比べ約15%高い価格を回答した。よって、環境ラベルタイプⅢは環境配慮型製品の購入を促すのに有効と考えられる。ただし、環境ラベルタイプⅢの内容が理解・判断できないとの意見もあった。

4.3 環境調和型製品普及への方策

以上の調査の結果、環境調和型製品が普及するための条件は、①価格が既存製品と同等であること、②その製品を買うことが持続可能社会に繋がることを消費者がきちんと理解すること、と言え、①②を満たすための方策として次のようなことが考えられる。

(1) 環境教育

子供たちへの教育だけではなく、消費者万人に対して「持続可能性」「環境に良い」といったことが具体的にはどのようなことなのかがきちんと理解できるようにする努力が必要である。筆者らのグループでは、本稿で示したような、マクロな持続可能性に関する情報提供と各対策技術に関する俯瞰的な評価情報が重要であると考えている。

(2) 環境ラベルタイプⅢ

いわゆるLCAのような定量化の結果を提示するものであり、消費者が理解しやすいように項目を工夫し、早期規格化を目指す努力が必要である。ただし、新素材や新製品のLCA結果は普及率や量産化など前提条件

件の変化で計算のもととなる原単位が大きく変化するものなので、感度解析などを十分に行った公正な提示が不可欠となり⁵⁾、現時点ではまず、より環境意識の高い消費者向けの補足的情報としての位置付けと考えている。

(3) 助成金

量産体制になるまで、既存製品との価格差を考慮して助成金を出せば効果的にKNFRPの普及を促すことが出来る。財源についての試算結果は紙面の都合上本稿では割愛するが、炭素関連税収（ガソリン税、温暖化対策税、持続可能税など）の一部で賄えることがわかっている⁴⁾。

(4) 炭素関連税

現在考えられている温暖化対策税では、産業保護のために原料としての化石燃料使用が実質非課税となるような仕組みであるが、これでは原料に再生可能資源を用いるインセンティブにはならないため好ましくない。市場原理を活用して持続可能社会に誘導する税制度が望まれる。

5. おわりに

本稿では成形技術や量産体制など力学特性やコストに大きく影響する技術開発と社会情勢の上限と下限を見ながら、ケナフ-ポリ乳酸系の複合材料を題材にその環境負荷低減のポテンシャルを示し、さらにそれらの情報を元に社会受容性に関する考察を行った。

結果として、KNFRPは従来素材の代替となりうる機能を持ち、環境・エネルギー問題の解決にも大きく寄与しうる持続可能な素材であると結論できよう。なお普及のポイントとなる素材の価格は、将来的に量産化が進めば従来素材と同等になると予想されることか

ら、一定期間の助成金や炭素関連税により生産量が伸び量産体制になれば、ケナフ繊維束強化ポリ乳酸樹脂は市場競争力を持つと考えられる。また同時に、環境配慮型製品の普及のためには環境ラベルの改良・規格化を進め、また環境教育を徹底することが重要であり、総合的な推進が不可欠であろう。

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構、地球温暖化対策技術開発に関する調査・生分解性プラスチックの普及に関する調査研究、平成13年度調査報告書、2002
- 2) 石賀敬、生分解性プラスチック 経済調査統計月報 No.347、中国電力経済研究センター、2003
- 3) 川島信之、植物を原料とするポリマー〔バイオベースポリマー〕ポリ乳酸の役割と用途開発状況、第20回グリーン購入研究会資料、2003
- 4) 浅井聰子、環境調和型複合材料の社会受容性評価、2003年度東京大学卒業論文
- 5) 高橋淳、FRPのLCA、強化プラスチックス、Vol.51、No.8、pp.61-64 (2005)
- 6) 石川雅紀・赤井誠監修・社団法人日本機械工業連合会編・株式会社富士総合研究所環境・資源エネルギー研究部著、企業のためのLCAガイドブック、日刊工業新聞社、2001
- 7) (社) 日本鉄鋼連盟、LCA的視点から見た鉄鋼製品利用のエネルギー評価調査、1997
- 8) Erwin T.H. Vink, Karl R. Rabago, David A. Glassner, Patrick R. Gruber, Applications of life cycle assessment to Nature Works polylactide (PLA) production, Polymer Degradation and Stability, 2002
- 9) Erwin T.H. Vink, 私信、2003
- 10) 倉田久敬、木製家具製造時の二酸化炭素放出量に関するケース・スタディ、高岡短期大学紀要第17巻、pp.127-138、2002
- 11) 株式会社電通P&D局計画管理部環境プロジェクト2002、「生活者の環境意識と行動」調査報告書、2002