

令和 5 年度地球観測技術等調査研究委託事業
「CFRP の真空対応ケミカルリサイクルシステム」
委託業務成果報告書

令和 6 年 5 月
京都府公立大学法人 京都府立大学

本報告書は、文部科学省の地球観測技術等調査研究
委託事業による委託業務として、京都府公立大学法
人京都府立大学が実施した令和 5 年度「CFRP の真
空対応ケミカルリサイクルシステム」の成果を取りまと
めたものです。

目次

1	はじめに.....	1
1.1	委託業務の目的.....	1
1.2	業務の方法.....	1
1.3	当該年度における委託業務の結果概要.....	1
2	実施内容.....	3
2.1	CFRP のケミカルリサイクル技術の構築.....	3
2.1.1	新規反応媒体の探索.....	3
2.1.2	新規反応媒体の分解条件の最適化.....	8
2.2	ケミカルリサイクルに適する CFRP のデザインング.....	12
2.2.1	バイオベースCFRP のデザインング.....	12
3	まとめ.....	26
4	添付資料.....	27

1 はじめに

1.1 委託業務の目的

炭素繊維強化材(CFRP)の航空宇宙分野での利用と宇宙空間などの真空下でのリサイクルを想定し、揮発性の低い媒体中での CFRP の分解及びケミカルリサイクル手法と、それに適する CFRP 用マトリックス樹脂の開発を目的とする。樹脂開発においてはエポキシ樹脂系を中心に検討を進めるが、硬化剤として導入する生物資源由来(バイオベース)の素材である PEG 改質リグニン(改質リグニン)が分解効率を向上する鍵であり、その適応性を精査する。分解媒体においては、ジアザビシクロウンデセン(DBU)などが真空下でバイオベースの樹脂を分解できることを掴んでおり、この特性を最大限に利用して、極限環境下でも活用できる新しい CFRP のケミカルリサイクルシステムを提唱する。

1.2 業務の方法

令和5年度における実施内容は、以下の通りである。

① CFRP のケミカルリサイクル技術の構築

a. 新規反応媒体の探索

前年度に引き続き、反応媒体の探索を行い、CFRP のマトリックス樹脂を分解可能な新規反応媒体を1つに絞り込む。

b. 新規反応媒体の分解条件の最適化

見出された反応媒体について、処理温度や処理時間など詳細に検討を行い、分解に最も適した条件を見出す。さらに、CFRP だけでなく樹脂そのものなども用いて、詳細な分解挙動を解明し、反応媒体の物性や分子構造などと CFRP 分解機能との関係を明らかにすることで、新規反応媒体の樹脂分解率に最適な処理条件を見出す。

② ケミカルリサイクルに適する CFRP のデザインング

改質リグニン系エポキシ樹脂では、バイオマス度の異なるマトリックス樹脂の物理特性にバリエーションをもたらせた改質リグニンへの展開を検討しケミカルリサイクルに適した系を見出して評価する。分解試験に供する CFRP を調製すると共に、樹脂においては、不飽和ポリエステル、ポリウレタン樹脂などへの展開を開始する。

③ 研究推進会議の開催

令和5年5月、10月、令和6年2月に研究推進会議を開催する。

1.3 当該年度における委託業務の結果概要

令和5年度における業務の結果概要は、以下の通りである。

① CFRP のケミカルリサイクル技術の構築

a. 新規反応媒体の探索

前年度に引き続き、反応媒体の探索を行い、CFRP のマトリックス樹脂を分解可能な新規反応媒体を1つに絞り込んだ。

b. 新規反応媒体の分解条件の最適化

見出された反応媒体について、処理温度や処理時間など詳細に検討を行い、分解に最も適した条件を見出した。さらに、CFRP だけでなく樹脂そのものなども用いて、詳細な分解挙動を解明し、反応媒体の物性や分子構造などと CFRP 分解機能との関係を明らかにすることで、新規反応媒体の樹脂分解率に最適な処理条件を見出した。

② ケミカルリサイクルに適する CFRP のデザインング

改質リグニン系エポキシ樹脂では、バイオマス度の異なるマトリックス樹脂の物理特性にバリエーションをもたらせた改質リグニンへの展開を検討しケミカルリサイクルに適した系を見出して評価した。分解試験に供する CFRP を調製すると共に、樹脂においては、不飽和ポリエステル、ポリウレタン樹脂などへの展開を開始した。

③ 研究推進会議の開催

令和5年5月、10月、令和6年2月に研究推進会議を開催した。

2 実施内容

2.1 CFRP のケミカルリサイクル技術の構築

2.1.1 新規反応媒体の探索

これまでの研究で先行反応媒体として、図 1 に示すような化学構造を有するジアザビシクロウンデセン(DBU)がリグニン系 CFRP のマトリックス樹脂分解に適していることを明らかにしている。令和 4 年度は、DBU に代わる新規反応媒体として、7 種類の DBU 類縁体を用いて、宮城化成から供与を受けた改質リグニン含有 CFRP に対して樹脂分解処理を行った結果、DBU 類縁体 A、F、G の 3 種類が DBU と同程度の分解能を有することを見出した。今年度は、これら 3 種類の DBU 類縁体の中から樹脂分解に優れた反応媒体を 1 つに絞り込み、温度や時間などの最適な処理条件について詳細に検討を行った。また、絞り出された新規反応媒体について、CFRP だけでなく樹脂そのものなども用いて、樹脂分解に最適な処理条件を見出した。

まず、令和 4 年度報告同様の簡便な方法にて、スクリーニングを行った。すなわち、3 種類の DBU 類縁体を用いて、改質リグニン含有率の異なる各種 CFRP を 100℃で所定時間分解処理し、その樹脂分解率を比較した。改質リグニン含有 CFRP (図 2 参照)は宮城化成から供与されたものを用いた。炭素繊維と樹脂は 60:40(重量比)であり、樹脂にはエポキシ樹脂を用いており、主剤と硬化剤を併せた重量と改質リグニンの重量比は所定のものを用いた(表 1)。改質リグニンは、それぞれ PEG400 を用いて調製したものである。

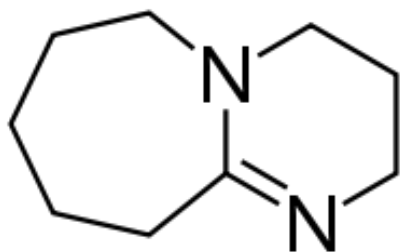


図 1 ジアザビシクロウンデセン(DBU)

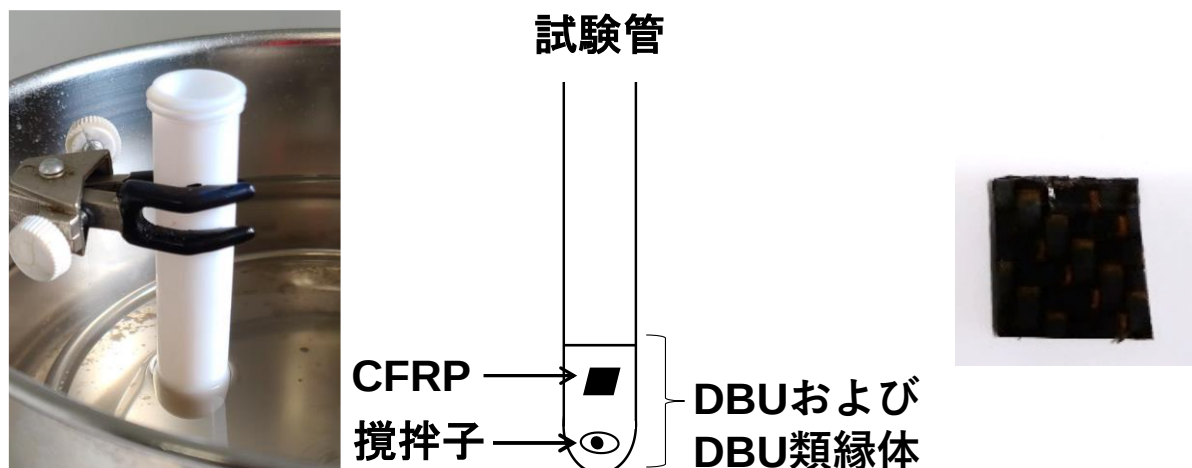


図 2 DBU および DBU 類縁体を用いた処理の様子(左)と用いた CFRP(右)

表 1 CFRP におけるマトリックス樹脂の比率

試料	主剤+硬化剤	改質リグニン
改質リグニン含有率 0%	100	0
改質リグニン含有率 16.7%	83.3	16.7
改質リグニン含有率 22.7%	77.3	22.7
改質リグニン含有率 27.7%	72.3	27.7

図 2 に示すように、試験管に DBU あるいは DBU 類縁体を入れ、そこに改質リグニン含有率の異なる各種 CFRP を投入、100℃のオイルバス中にて所定時間分解処理を行った。反応終了後、DBU または DBU 類縁体不溶残渣をろ過装置に投入し、CFRP に付着している DBU または DBU 類縁体を除去した。続いて、それら不溶残渣を新しい DBU または DBU 類縁体の入ったフラスコに移して 30 分攪拌する作業を 2 回、その後さらに蒸留水でも 30 分攪拌する作業を 2 回行い、CFRP に付着している DBU または DBU 類縁体の洗浄を行った。洗浄作業後、不溶残渣をろ過装置に投入し、ろ液が中性になるまで大過剰の蒸留水を加えてろ過した。その後、得られた不溶残渣を 105℃で 12 時間以上乾燥させて残渣重量を求めた。下式(A)により樹脂分解率を算出した。

$$\text{樹脂分解率(\%)} = \frac{\text{CFRP 仕込み重量} - \text{残渣重量}}{\text{CFRP 仕込み重量} \times \text{樹脂含有率 40\%}} \times 100 \quad \dots\dots (A)$$

図3に、各種 DBU 類縁体を用いて改質リグニン含有率の異なる各種 CFRP を 100℃で所定時間処理したときの樹脂分解率を示す。いずれの DBU 類縁体においても、マトリックス樹脂中の改質リグニン含有率が高くなるほど、また反応時間が経過するにつれて樹脂分解率が高くなることが分かった。特に、DBU 類縁体 F については、低リグニン含有率、短時間処理の場合でも、DBU に比べて高い樹脂分解率を示した。図4および5には、DBU および DBU 類縁体 A、F、G を用いて、100℃にて 24 および 48 時間分解処理を行った時の不溶残渣の様子を示している。この結果は図3での樹脂分解率との結果とよく一致している。改質リグニン含有率 0% および 16.7% では、DBU に比べ DBU 類縁体 F で著しく炭素繊維の解繊が促進されている。

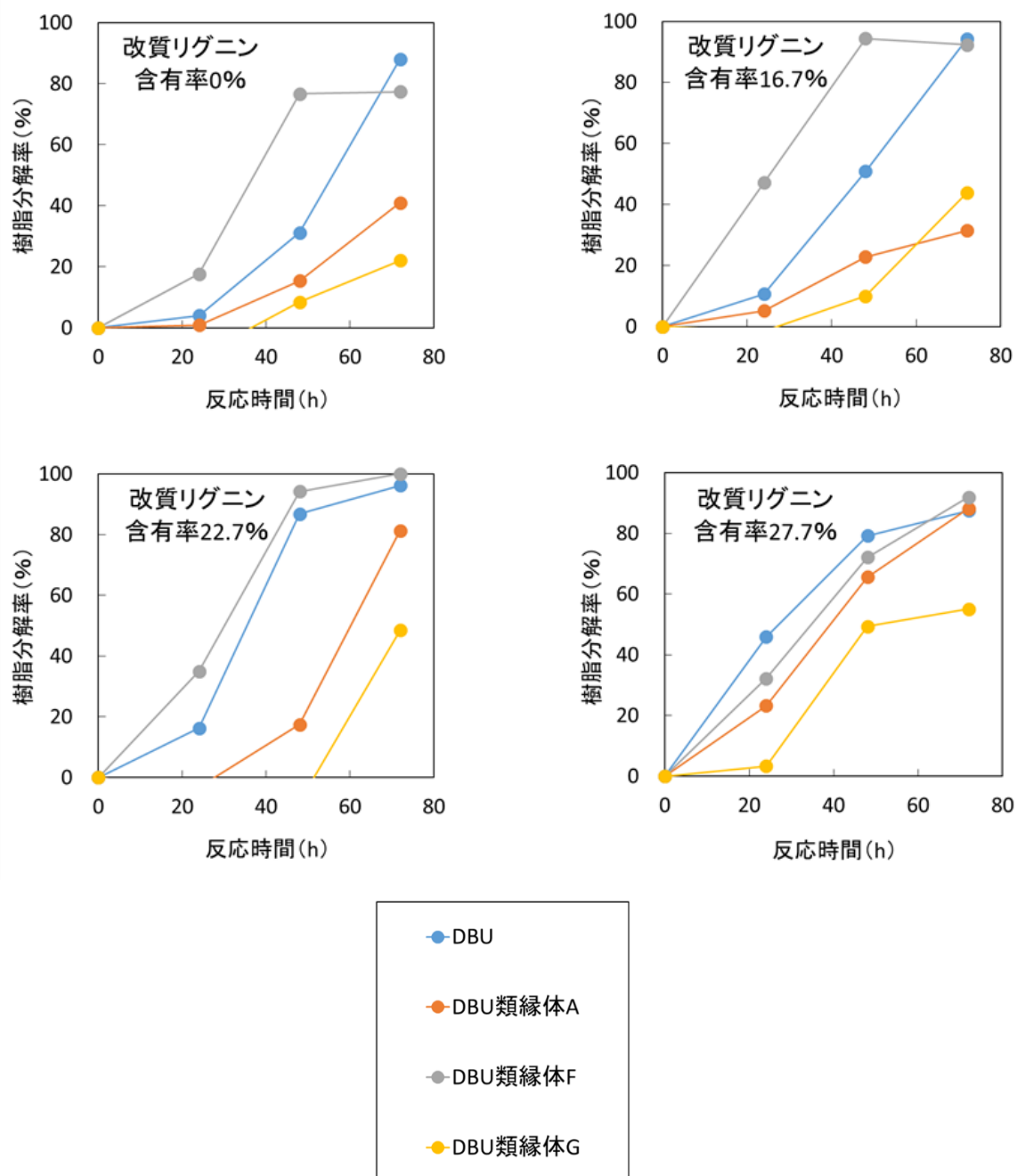


図3 各種反応媒体を用いた改質リグニン含有 CFRP の反応時間と樹脂分解率関係

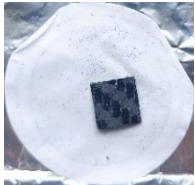
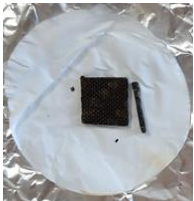
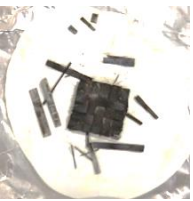
	改質リグニン含有率(%)			
	0%	16.7%	22.7%	27.7%
DBU				
DBU類縁体A				
DBU類縁体F				
DBU類縁体G				

図4 DBUおよびDBU類縁体を用いて分解処理した後の不溶残渣の様子(100℃、24時間)

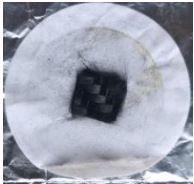
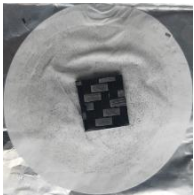
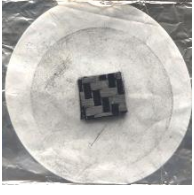
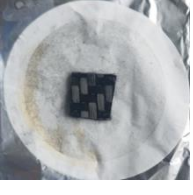
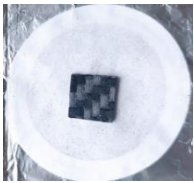
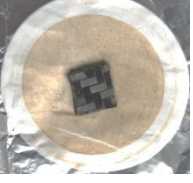
	改質リグニン含有率(%)			
	0%	16.7%	22.7%	27.7%
DBU				
DBU類縁体A				
DBU類縁体F				
DBU類縁体G				

図5 DBUおよびDBU類縁体を用いて分解処理した後の不溶残渣の様子(100°C、48時間)

以上の結果より、3 種類の候補反応媒体の中から、CFRP マトリックス樹脂を分解可能な新規反応媒体として、DBU 類縁体 F を絞り出した。令和 5 年 10 月開催の研究推進会議にて、樹脂分解性および CFRP 調製可能性の 2 つの特性から最適な改質リグニン含有率を 16.7%と決定し、宮城化成より PEG 分子量の異なる改質リグニン含有 CFRP の供与を受けた。

2.1.2 新規反応媒体の分解条件の最適化

絞り出された DBU 類縁体 F を用いて、改質リグニン中の PEG 分子量が CFRP のマトリックス樹脂分解性に与える影響について検討を行った。各種改質リグニン含有 CFRP は宮城化成から供与されたものを用いた。炭素繊維と樹脂は 60:40(重量比)であり、樹脂にはエポキシ樹脂を用いており、主剤と硬化剤を併せた重量と改質リグニンの重量比が 83.3:16.7 のものを用いた。すなわち樹脂部の改質リグニン含有率は 16.7%である。改質リグニン GL200 および GL600 は、それぞれ PEG200 および PEG600 を用いて調製したものである。各改質リグニンと平均分子量の関係は表 2 の通りである。

表 2 各種改質リグニンと平均分子量

改質リグニン	重量平均分子量 (Mw)	数平均分子量(Mn)
GL200	9000	2300
GL600	5900	2000

図 2 に示すように、試験管に DBU または DBU 類縁体 F を入れ、そこに PEG 分子量の異なる改質リグニンを添加した各 CFRP を投入し、80℃または 100℃のオイルバス中にて 24 時間分解処理を行った。反応終了後の残渣洗浄および樹脂分解率の算出方法は、上述した改質リグニン含有率が CFRP のマトリックス樹脂分解性へ与える影響について検討した場合と同様である。上述の式(A)により樹脂分解率を算出した。

DBU 類縁体 F を用いて、PEG 分子量の異なる改質リグニンを添加した各 CFRP を 80℃または 100℃で 24 時間処理したときの樹脂分解率を表 3、4 にそれぞれ示す。100℃処理では、いずれの反応媒体を用いても、GL200 含有 CFRP が GL600 含有 CFRP よりも高い樹脂分解率を示した。GL200 は GL600 に比べて、マトリックス樹脂の分解効率を向上させるバイオベース素材として適しているといえる。これは、GL200 分子内に導入された PEG 分子量が GL600 のそれに比べて小さいために、「分解の起点」の数が多く存在するためであると考えられる。

さらに、より穏和な 80℃処理では、DBU 類縁体 F と GL200 含有 CFRP の組み合わせにおいて、高い樹脂分解率(109%)が示された。DBU 類縁体 F が DBU に比べて、マトリックス樹脂の分解効率を向上させる新規反応媒体であることを示唆している。

ただし、サンプルによっては樹脂分解率が 100%を超えるものや負の値(重量増加)のものも認められ、多少の誤差が含まれている。

一方で、2.2 ケミカルリサイクルに適する CFRP のデザインング にて後述する通り、樹脂開発においては GL200 よりも GL400、GL600 が機械的物性や CFRP 加工性の観点で優れていることから、バイオベース素材としての改質リグニン、および分解媒体としての DBU 類縁体 F それぞれの特性を最大限に利用して、極限環境下でも活用できる新しい CFRP のケミカルリサイクルシステムについての検討を重ねる必要がある。

表 3 DBU および DBU 類縁体 F を用いた改質リグニン含有 CFRP の樹脂分解率(100℃、24 時間)

反応媒体	樹脂分解率(%)	
	GL200 含有 CFRP	GL600 含有 CFRP
DBU	96.3	63.1
DBU 類縁体 F	100	62.5

表 4 DBU および DBU 類縁体 F を用いた改質リグニン含有 CFRP の樹脂分解率(80℃、24 時間)

反応媒体	樹脂分解率(%)	
	GL200 含有 CFRP	GL600 含有 CFRP
DBU	38.4	-4.00
DBU 類縁体 F	109	10.6

さらに、DBU 類縁体 F を用いた GL200 含有マトリックス樹脂そのものの分解挙動についても検討を加えた。GL200 含有マトリックス樹脂は宮城化成から供与されたものを用いた。樹脂にはエポキシ樹脂を用いており、主剤と硬化剤を併せた重量と改質リグニンの重量比が 83.3:16.7 のものを用いた。すなわち樹脂部の改質リグニン含有率は 16.7%である。改質リグニンは、PEG200 を用いて調製したものである。

図 6 に示すように、試験管に DBU または DBU 類縁体 F を入れ、そこに GL200 含有マトリックス樹脂を投入し、80℃または 100℃のオイルバス中にて 24 時間分解処理を行った。反応終了後、DBU または DBU 類縁体 F 不溶残渣をろ過装置に投入し、樹脂に付着している DBU または DBU 類縁体 F を除去した。続いて、それら不溶残渣を新しい DBU または DBU 類縁体 F の入ったフラスコに移して 30 分攪拌する作業を 2 回、その後さらに蒸留

水でも 30 分攪拌する作業を 2 回行い、樹脂に付着している DBU または DBU 類縁体の洗浄を行った。洗浄作業後、不溶残渣をろ過装置に投入し、ろ液が中性になるまで大過剰の蒸留水を加えながらろ過した。その後、得られた残渣を 105℃で 12 時間以上乾燥させて残渣重量を求めた。下式(B)により樹脂可溶率を算出した。

$$\text{樹脂可溶率(\%)} = \frac{\text{樹脂仕込み重量} - \text{残渣重量}}{\text{樹脂仕込み重量}} \times 100 \quad \dots\dots(B)$$

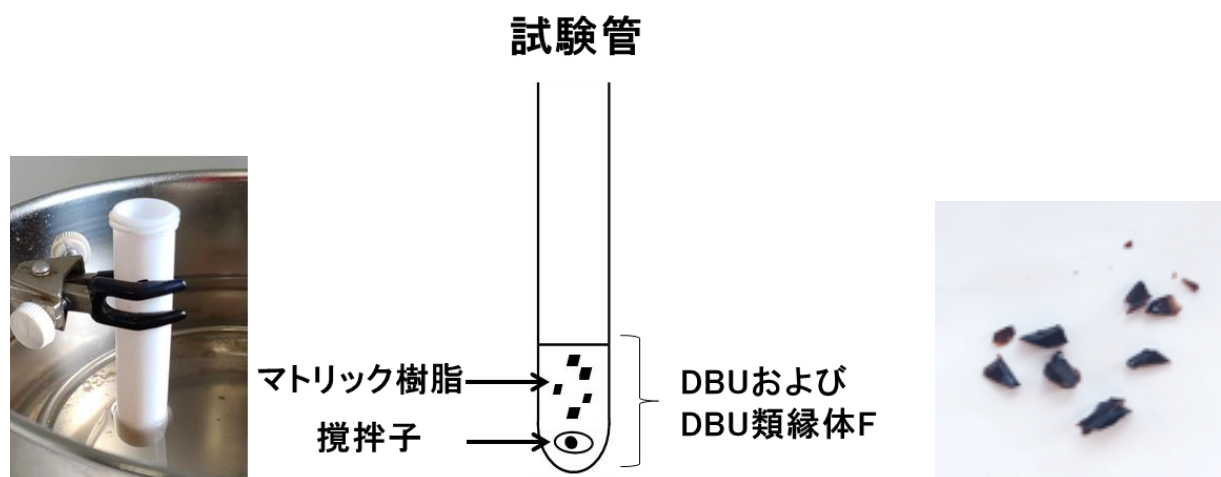


図 6 DBU および DBU 類縁体 F を用いた処理の様子(左)と用いた GL200 含有マトリックス樹脂(右)

表 5 に、DBU および DBU 類縁体 F を用いて GL200 含有樹脂を 80 または 100℃で 24 時間処理したときの樹脂可溶率を示す。100℃処理では、いずれの反応媒体でも高い樹脂可溶率を示したが、80℃処理では、DBU 類縁体 F が DBU に比べて著しく高い可溶率を示した。図 7 に、DBU 類縁体 F を用いて GL200 含有樹脂を各温度で分解処理した後の不溶残渣(DBU 類縁体 F 除去後)の様子を示す。100℃処理では、ほぼ可溶化するため不溶残渣は確認できないが、80℃処理では写真に示すようなゲル状の不溶残渣が確認された。G200 含有マトリックス樹脂は、DBU 類縁体 F に完全可溶化する前にゲル化分解挙動を示すことがわかった。

表 5 DBU および DBU 類縁体 F を用いて GL200 含有樹脂を 24 時間処理したときの樹脂可溶率

反応媒体	樹脂可溶率(%)	
	80℃処理	100℃処理
DBU	0.51	97.0
DBU類縁体F	64.0	97.6



図 7 DBU 類縁体 F を用いて GL200 含有樹脂を 24 時間分解処理した不溶残渣の様子

図 8 に、DBU または DBU 類縁体 F を用いて GL200 含有マトリックス樹脂を 80℃または 100℃で 24 時間処理した後、その各可溶部を高速液体クロマトグラフィー（HPLC）により分析し、得られたクロマトグラムを示す。100℃処理ではいずれの反応媒体でも 22 分付近に顕著なピークがあったが、80℃処理ではこのピークが DBU 類縁体においてのみ確認された。マトリックス樹脂または改質リグニンから分解を受けた何らかの低分子化合物が可溶化していることが分かる。図 7 に示したとおり、GL200 含有マトリックス樹脂は DBU 類縁体 F に完全可溶化する前にゲル化分解挙動を示すことから、樹脂モノマーの回収可能性についても、今後分析を進めていく予定である。

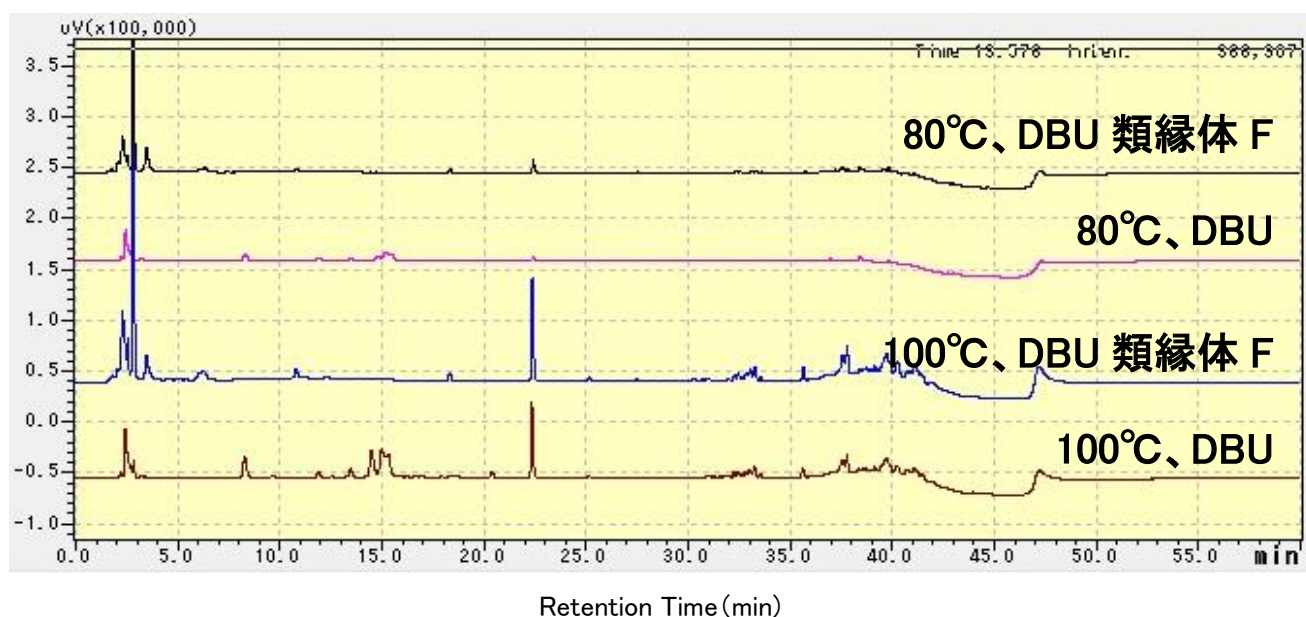


図 8 GL200 含有樹脂を DBU および DBU 類縁体 F を用いて 24 時間処理した後の可溶部 HPLC クロマトグラム

2.2 ケミカルリサイクルに適する CFRP のデザイン

2.2.1 バイオベースCFRP のデザイン

当課題においては、CFRP のマトリックス樹脂の素材となるバイオベースの原料の供給が重要となっている。担当者は様々な木質バイオマスを検討する中で、芳香族化合物源として、リグニンと総称される木材成分に注目すると共に、それに加工性を持たせる形に改質しながら取り出す手法を開発している。手法としては、酸加溶媒分解反応を応用し、木材成分と親和性の高い媒体中での分解を行った。媒体としてはポリエチレングリコール (PEG) を用い、PEG 中で酸分解すると同時の PEG 改質を行った。得られたリグニン分解物の PEG 誘導体は PEG 改質リグニンであり、単に改質リグニンとも呼ばれる。また、PEG などのグリコール類による分解物であるのでグリコールリグニン (GL) とも呼ばれる。図 9 に PEG 中での木材の分解による改質リグニンの製造の模式図を示す。

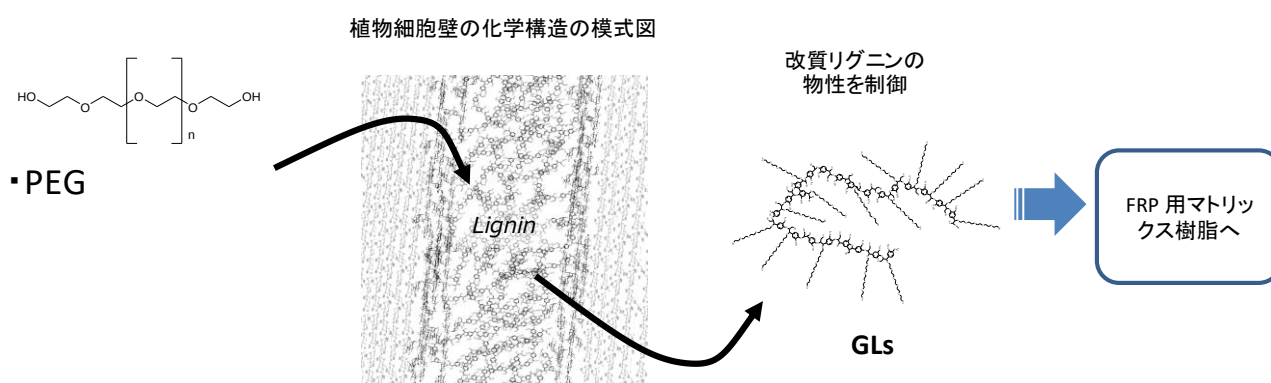


図 9 PEG 中での木材の分解と改質リグニン (GL) の生成の模式図

改質リグニンサンプルの製造は、昨年度と同じく、森林総研内のベンチプラントを稼働して行った (図 10)。なお、原料木粉としてスギ材を使用している。スギは日本固有種の針葉樹で、含まれるリグニンの構造が比較定期安定なためこの種の工業用素材として適しており活用している。

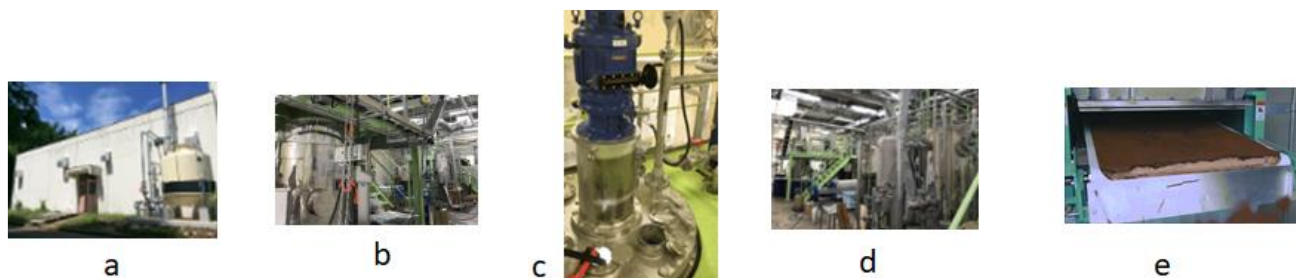


図 10 改質リグニン製造ベンチプラント a: 外観、b: リアクター外観、c: リアクター上部、d: 内観、e: 連続ろ過の様子

製造は以下のプロセスで行った。スギ木粉(含水率約10%)を乾燥重量を 40kgに相当する量としてリアクターに導入し、触媒として 0.3wt%を含む PEG を 200kg投入した。PEG の種類は平均分子量、200, 400, 600 の 3種類を用いた(以下、PEG200, PEG400, PEG600 と表記)。リアクターは水蒸気ラインによる外部加熱で 140℃まで昇温し、90 分間保持した。反応後、希釈薬剤として 0.2N の NaOH 水溶液を投入してよく攪拌した。この工程により PEG 分解で遊離した改質リグニンをアルカリ水に溶解させることができる。続いてリアクター内のスラリー全体をフィルタープレスに流し込み、固液分離した。この工程での不溶部はセルロースを主成分とするパルプである。改質リグニンはアルカリに溶解しており、全量をpH調整タンクに送った後、薄い硫酸で pH を 2 に合わせた。このプロセスでアルカリ中の改質リグニンは沈殿として遊離することができる。遊離した改質リグニンを連続遠心分離装置で分離して、乾燥した。精製した改質リグニンの性質は次の項目で整理した(表 6)。

- ①UV-リグニン率:リグニンの芳香環のもつ紫外吸収 280nm の強度を計測し、クラーソンリグニン量換算で算出。吸光度係数 23.95 L/g・cm
- ②分子量:DMF に 10 mM LiBr を含む溶液を溶媒として Shodex KD-G、KD-802、KD-804 カラムを直列に繋いだ GPC システムで測定した。換算は PEG 標準試薬の分子量データから算出した。
- ③ガラス転移温度、熱溶融温度:熱機械分析装置(TMA)を使用し、サンプルをプラチナサンプルパンに仕込み蓋をした後の針入れモードで、ガラス転移温度(T_g)と熱溶融温度(T_f)を測定した。
- ④熱分解開始温度、熱分解最大温度:熱重量測定装置(TGA)により測定した。

なお、PEG200, PEG400, PEG600 を用いて調製した改質リグニン(GL)を以下、GL200, GL400, GL600 と表記する。これら 3 種の改質リグニンを基本スペックの樹脂原料としてとして CFRP 製造に供した。

表 6 改質リグニン(GL200, GL400, GL600)の物理特性

	UV-リグニン率	分子量		ガラス転移温度	熱溶融温度	熱分解開始温度	熱分解最大温度
		M_w	M_n				
GL200	81±2	9000	2300	89	133	246	364
GL400	82±2	6000	2100	86	120	275	362
GL600	80±2	5900	2000	80	113	292	367

繊維強化材のマトリックス樹脂として最も多いのが不飽和ポリエステルである。不飽和ポリエステルは、ラジカル共重合により硬化が進むため、フェノール性水酸基などがあると硬化が進行しない。一方、改質リグニンには多数のフェノール性水酸基が含まれるため、不飽和ポリエステルとの組み合わせは困難であった。そこで、改質リグニン中の水酸基を保護することにより新たな誘導体を調製し、不飽和ポリエステルとの組み合わせを検討した。

これまでに担当者らは、改質リグニンにエチレンオキシドなどのアルキレンオキシドを付加すると、PEG 鎖が伸長して、材料としての性質を簡単に制御できることを見出している(特開 2021-147409)。この手法により改質リグニンは様々な媒体に溶解するようになるため、Multi-soluble type of glycol lignin という意味で「改質リグニン MS シリーズ」と呼んでいる(以下 MS)。なお、MS は日本乳化剤(株)との協力で開発した。MS 製造時の反応メカニズムを考慮すると、改質リグニンに由来するフェノール性水酸基はアルキレンオキシドで誘導体化され、保護される可能性が高い(図 11)。そこで、反応の度合いの異なる MS を製造し、不飽和ポリエステルとの組み合わせに供した。原料とする改質リグニンはすべて GL400 とした。結果は 2.2.2②の項に示す。

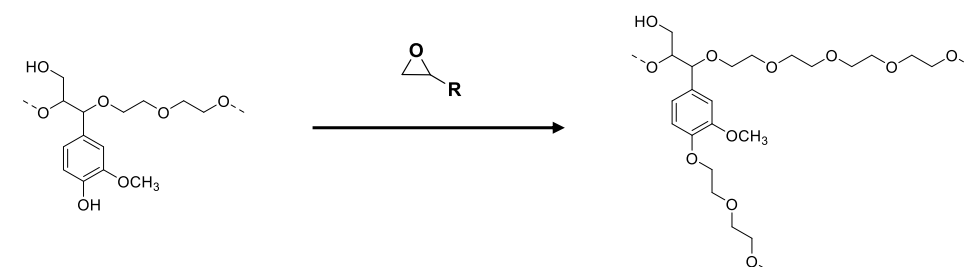


図 11 グリコールリグニンへのアルキレンオキシドの付加による MS シリーズの調製における反応模式図

2.2.2 ケミカルリサイクル適合型 CFRP の調製

① 改質リグニン添加エポキシ樹脂の CFRP 調製

昨年度までに、改質リグニン PEG400 を用いて、CFRP 成形調製条件を確認しリサイクル評価に供するための CFRP 試料調製条件を確立し、京都府立大学によるケミカルリサイクル評価試料として提供することで、昨年度までの成果を得た。

本年度は、分子量の異なる改質リグニン原料 3 種を用いて、改質リグニン種の CFRP のケミカルリサイクルに及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、その CFRP 試料の調製条件を確立しケミカルリサイクル評価用試料として、計画通りの提供を行った、これにより当初の目標を達成した。樹脂調製及び CFRP 化の詳細は、以下の項目(1)及び項目(2)で述べる。

改質リグニン PEG600 の樹脂含有率とケミカルリサイクル性の関係を明らかにする事を目的に、含有率の異なる改質リグニン CFRP の作製条件の検討を進め、最終的にケミカルリサイクル性評価用試料 3 種の追加提供を果たした。評価用 CFRP 試料の一覧表を表 7 にまとめて示す。昨年度までに評価を進めた CFRP 組成は、表内

のオレンジ色セル部であるが、今回改質リグニン種の効果を明らかにしたのは、表内の黄色セル部分 CFRP であり、これらの提供を達成することで本年度の目標を達成した。

表 7 CFRP 化の改質リグニン種とエポキシ樹脂への含有率マップ

GL含有率(%)	0	8.3	16.7	22.7	27.7
GL200					
* GL400					
GL600					

- ・強化繊維：（東レ）トレカクロスCO6347BL 厚み0.22mm × 4Ply
- ・マトリックス樹脂： 改質リグニンGL含有 熱硬化エポキシ樹脂

(1) 改質リグニン種 3 種の違いによる樹脂部調製

森林総研から、分子量の異なる改質リグニン(GL)3種(GL200, GL400, GL600)の提供を受け、エポキシ樹脂への添加率 16.7%で調製したマトリックス樹脂を適用して CFRP4ply 成形体を得た。また、その CFRP の機械的強度を評価して、分子量の異なる GL3 種の添加効果を確認した。

図 12 に、分子量の異なる改質リグニンをエポキシ樹脂に混合分散した時の、硬化前の調製樹脂(上側)と硬化後の樹脂ペレット(下側)を示す。分子量が増す程、GL200→GL600 分散温度を下げる事が出来、得られる調製樹脂の流れ性も大きく改善され加工性が向上する事が確認された。改質リグニン添加熱硬化 エポキシ樹脂の成形性の観点から、GL600 の適用が最も有利であることが確認された。加工性の詳細を表 8 の上段に示す。また、硬化後の樹脂ペレットの耐熱性への影響を調査した。120℃、60 分キュアー後の樹脂ペレットに各温度での再加熱を施し、ペレットのショアーD硬度変化を測定しグラフ化したものを、図 13 に示す。これによると、キュアー温度(120℃)以下の領域では、改質リグニン種添加剤の差はほとんど認められず、少なくとも、再加熱温度 110℃以下では、熱硬化エポキシ樹脂の物性が優位であり、改質リグニン種の違いによる影響はないといえる。

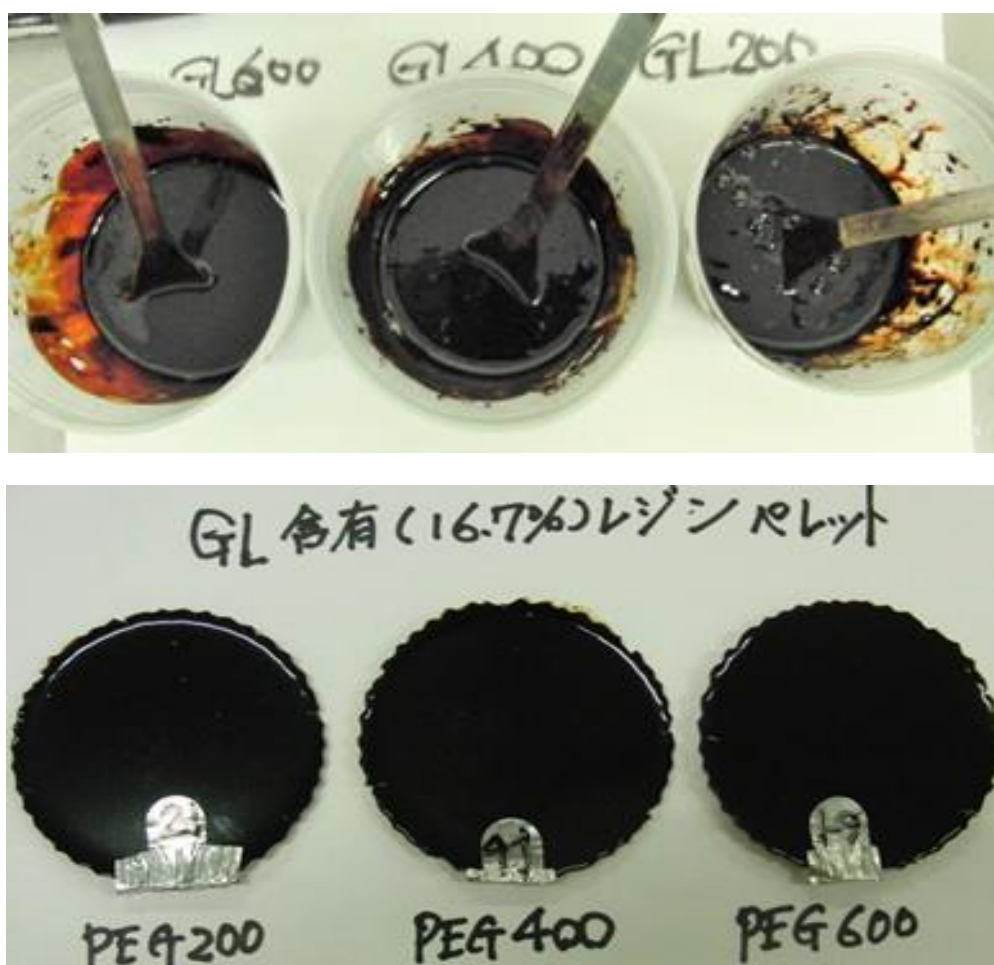


図 12 異なる改質リグニン種添加エポキシ樹脂の調製樹脂(上側)と硬化後の樹脂ペレット(下側)

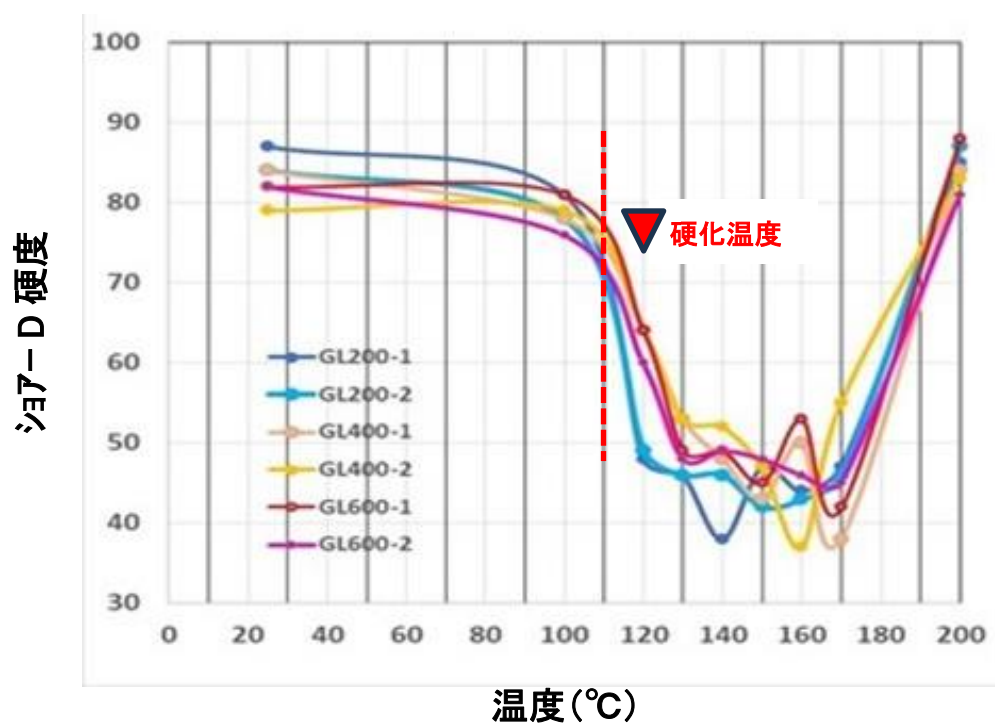


図 13 3 種の GL を適用(含有率 16.7%)したレジンペレットの加熱硬度変化

(2) 異なる改質リグニン種添加エポキシ樹脂による CFRP 化の検討

前述の 3 種の樹脂部をマトリックス樹脂として、CFRP 試料の作製条件を検討した。CFRP 化の条件は、以下のとおりである

- i) マトリックス樹脂: 異なる改質リグニン種添加熱硬化エポキシ樹脂
(改質リグニンの添加率数値は表 1 参照のこと)
- ii) 強化繊維 : トレカクロス CO6347BL、積層数; 4 層
- iii) CFRP 成形体 : サイズ; A4 サイズ、工法; インフュージョン成形

CFRP 化にあたり、改質リグニン種の違いにより、調製樹脂の流れ性が大きく変化するものの、調製樹脂とカーボン強化繊維間の親和性には、作業上問題となる顕著な差は認められなかった。

CFRP 化を進める際の、異なる改質リグニンエポキシ樹脂調製条件の詳細を、表 8 上段に、また、得られた CFRP 試料の機械的物性についても、同表の下段にまとめて示す。添加する改質リグニンの分子量が増す程 (GL200→GL400→GL600) 樹脂調製時の混合分散温度を 20～30℃下げることが可能になり、そこで得られる樹脂の流れ性も、大きく改善されており、成形時間のタクト短縮に大きな効果を発揮する。更に、CFRP 成形時のインフュージョン成形時の樹脂注入温度も 5～15℃下げられることで注入樹脂のライフタイムも 2～3 倍に伸びるといいう工業化に際してのメリットも確認できた。

これらの条件下で得られた CFRP 成形体の機械的物性値は、マトリックス樹脂中の改質リグニンの分子量が増す程 (GL200→GL400→GL600)、最大点曲げ応力は増加傾向にあり、弾性率は GL600 添加樹脂で若干減少傾向を示す一方最大点歪は若干増加傾向を示す。これら機械的物値の変化をグラフ化して図 14 および図 15 に示す。

このように、新たに導入した、改質リグニン GL600 でマトリックス樹脂の加工性が大幅に改善され、そこから得られた CFRP の機械的物性も良好であることを確認したため、GL600 の添加効果をケミカルリサイクル性にて確認することを目的に、GL600 添加量、0、16.7、27.7%の 3 水準について評価用 CFRP を追試作して、最終的に表 7 の黄色セル部計 5 種類の CFRP をケミカルリサイクル性評価用試料として提供し、本年度の目標を達成した。

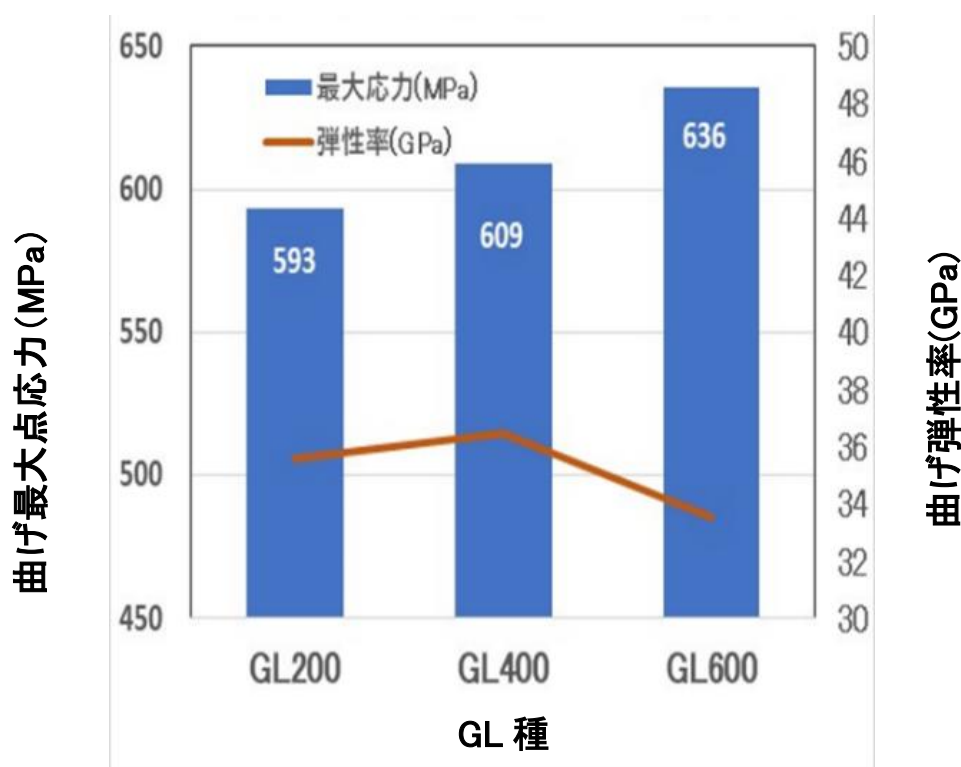


図 14 GL 種添加 CFRP の曲げ最大点応力と弾性率

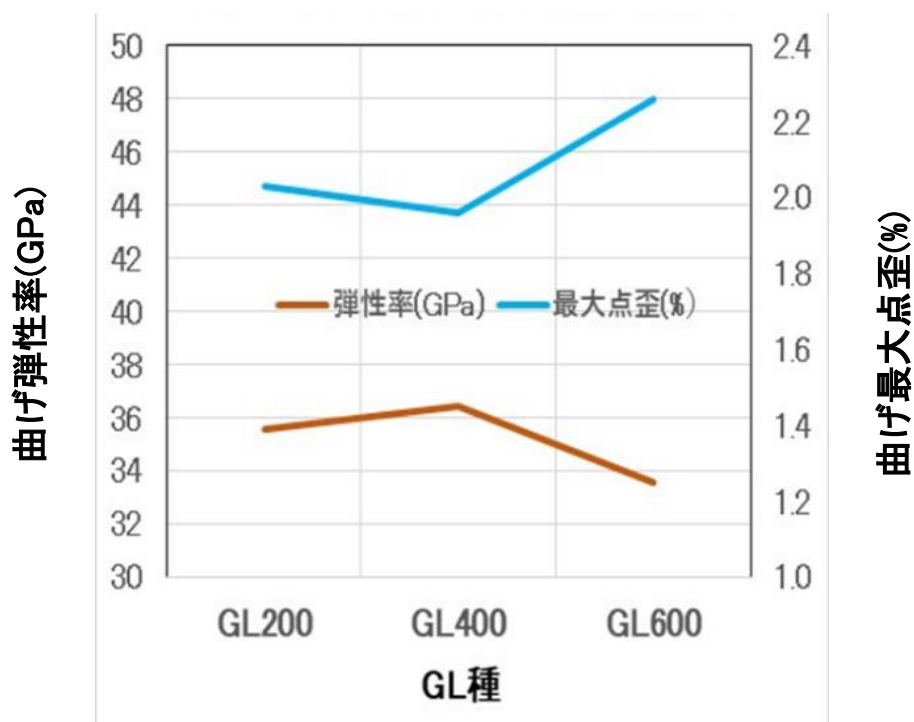


図 15 GL 種添加 CFRP の曲げ弾性率と最大点歪

表 8 分子量の異なる改質リグニン種による加工性と CFRP 成形体物性

	含有DL種	GL200	GL400	GL600	備考
成形・加工性	混合分散性(流れ性)	○	○	◎	
	混合分散温度(°C)	95	85	65	
	樹脂注入成形温度(°C)	100	95	85	
	繊維(CF)への含浸性	○	○	◎	
	樹脂ゲル化時間(h)	0.8h △	1.0h ○	1.5h ◎	
物性	混合樹脂硬度(ショアーD/RT)	85.1	81.5	81.5	図2
	CFRP 最大点応力(MPa)	593	609	636	図3
	CFRP 弾性率(GPa)	35.6	36.5	33.5	図3、図4
	CFRP 最大点歪(%)	2.04	1.96	2.26	図4

② 改質リグニン添加不飽和ポリエステル樹脂の CFRP 調製

昨年度までに、不飽和ポリエステル樹脂に現状の改質リグニンを添加した場合、不飽和ポリエステル樹脂の硬化反応を阻害してしまい、改質リグニン添加不飽和ポリエステル硬化樹脂が得られない事を報告している。これらの解決策として改質リグニン組織を化学修飾して不飽和ポリエステル樹脂の硬化反応を阻害しない構造に改質することが求められた。

そこで前述の改質リグニン MS シリーズを調製し、不飽和ポリエステルとの組み合わせを検討した。前実験においては、MS シリーズは不飽和ポリエステルの硬化を妨げない事を確認した。そこで、改質リグニン添加不飽和ポリエステル樹脂による CFRP 化を検討して機械的物性への影響を評価した。

最終的にはA4サイズ相当の CFRP の試作に成功し、リサイクル性評価用 CFRP 試料を京都府立大学に提供し、本年度の目標を達成した。

以下にその詳細を述べる。

(1) 改質リグニン MS シリーズ添加不飽和ポリエステル樹脂の硬化条件の検討

森林総研より提供された、改質リグニン MS シリーズの 4 種類について検討を進めた。改質リグニン添加不飽和ポリエステル樹脂の調製は、室温にて図 16 のフローに従って行われた。以下に、不飽和ポリエステル樹脂系及び改質リグニンMS 剤系の詳細を記す。

i) 不飽和ポリエステル樹脂材： 常温硬化

- ・主剤 : 不飽和ポリエステル樹脂
- ・硬化促進剤 : 2-エチルヘキサン酸コバルトほか (対主剤 0.5%添加)
- ・硬化剤 : アセチルアセトンパーオキシサイド 34%(対主剤 2.0%添加)

ii) 改質リグニン GL400 含有 MS シリーズ (森林総研提供)

(・薬剤 A で GL400 を改質したもの)

GL400 含有率 20, 25, 33, 50% の 4 種類を検討対象とした。

樹脂硬化条件検討のための、MS 添加不飽和ポリエステル樹脂試料一覧を、表 9 および表 10 に示す。また、図 17 に、4 種の MS シリーズ外観と改質リグニン MS 添加不飽和ポリエステル樹脂 NO.0 および NO.1～NO.8 樹脂の室温硬化待ちでの試料外観写真を示す。

樹脂試料 NO.は、改質リグニン添加無しの従来の不飽和ポリエステル樹脂 NO.0 を基準値として、MS 添加試料が、NO.1～NO.8 までの、計 9 試料での室温硬化時間を比較することで、CFRP 化のための最適候補条件を絞り込んだ。

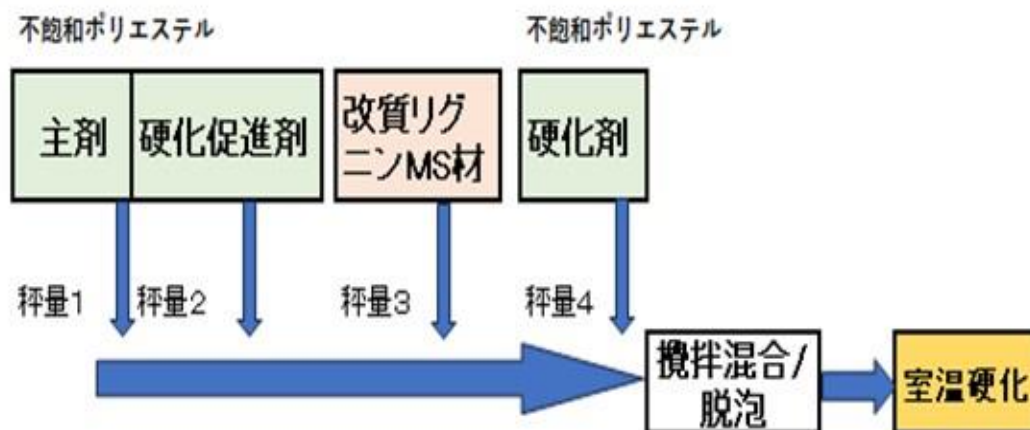


図 16 MS 添加不飽和ポリエステル樹脂の調製フロー

表 9 改質リグニン MS 添加量 10% 時の MS 添加不飽和ポリエステル樹脂の硬化時間

試料 NO.	0	1	2	3	4
MS 中の改質リグニン率(%)	0	20	25	33	50
MS 添加率(%) (主剤に対し)	0	10	10	10	10
不飽和ポリエステル樹脂内訳	主剤(100g) + 硬化促進剤(0.5 g) + 硬化剤(2.0g) + 改質リグニン MS 剤				
室温硬化時間(分)	◎15 以内		○45 以内	△90 以上	×硬化せず

表 10 改質リグニン MS 添加量 20% 時の MS 添加不飽和ポリエステル樹脂の硬化時間

試料 NO.	—	5	6	7	8
MS 剤中の改質リグニン率(%)	—	20	25	33	50
MS 添加率(%) (主剤に対し)	—	20	20	20	20
不飽和ポリエステル樹脂内訳	主剤(100g) + 硬化促進剤(0.5 g) + 硬化剤(2.0g) + 改質リグニン MS 剤				
室温硬化時間(分)	◎15 以内		△90 以上	×硬化せず	

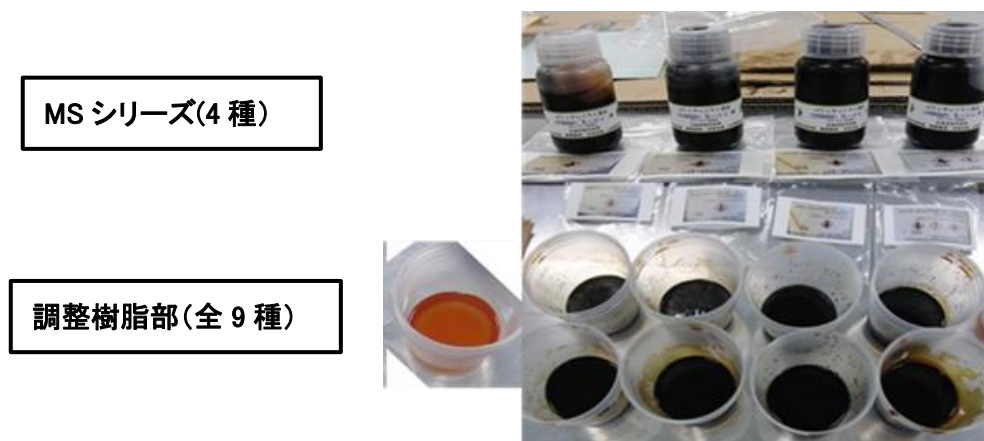


図 17 MS シリーズ及び不飽和ポリエステル調製樹脂部写真

表 9 および表 10 の結果から、各種組成で調製され、不飽和ポリエステル樹脂が室温静置にて 15 分間以内の比較的短時間で室温硬化に至った試料は、NO.0, NO.1 および NO.5 あった。MS 剤中の改質リグニン含有率が増す程、または MS 剤の添加率が大きい程不飽和ポリエステル樹脂系の室温硬化時間が長くなる傾向が見られ、試料 NO.4, NO.7, NO.8 は室温放置数時間経過しても硬化に至らないことが確かめられた。

以上の事象を確認して、CFRP 化を目指す組成候補として、試料 NO.1 および NO.5 すなわち、改質リグニン MS 剤での改質リグニンを 20%含有する MS 剤が CFRP 化の主力候補に選ばれ、次ステップの CFRP 化プロセス検討が進められた。

(2) 改質リグニン MS 添加不飽和ポリエステル樹脂の CFRP 化検討と評価

前述の MS 添加不飽和ポリエステル樹脂をマトリックス樹脂として CFRP 化の検討を進めた。
CFRP 成形体の構成を以下に記す。

- i) マトリックス樹脂: MS(改質リグニン GL400、20%含有)添加不飽和ポリエステル樹脂
- ii) 強化繊維: トレカクロスCO6347BL、積層数;4 層
- iii) CFRP 成形体: サイズ;A4 サイズ、工法;インフュージョン成形(加熱硬化温度 55℃)
(最終熱処理 115℃÷60 分)

インフュージョン成形に先立ち、CFRP での硬化条件を確認するためにハンドレイアップによる CFRP 化を試みた。MS 添加率 0, 10, 20%での CFRP4Ply のハンドレイアップ成形写真を図 18 に示す。樹脂部単独の硬化条件とは異なり、炭素繊維との複合化を進めた場合、室温での硬化反応に遅れを生じる事が確認され、加熱硬化温度を 55℃前後とした。また、得られた成形体は改質リグニン GL400 を含有するため改質リグニンの軟化温度を考慮して 115℃÷60 分の最終熱処理条件を設定した。

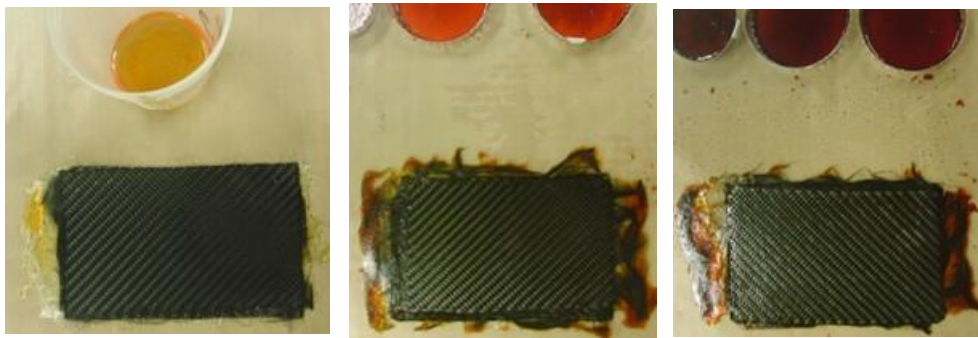


図 18 MS 剤添加率 0, 10, 20%での CFRP4Ply のハンドレイアップ成形写真

以上の CFRP 化予備実験の結果に基づき、最終的にはインフュージョン成型法による CFRP 化の試作を行った。得られた CFRP の曲げ強度試験評価結果を表 11 中にまとめて示す。また、得られた A4 サイズ CFRP4Ply の試料写真を図 19 に示す。これら CFRP の曲げ強度試験結果をグラフ化して、図 20 および図 21 に示す。

図 20 の主剤に対する MS 添加量と CFRP の曲げ強度の結果から、不飽和ポリエステル樹脂 CFRP の場合においても、エポキシ樹脂 CFRP の時と同じく、改質リグニン添加による CFRP 強度増加効果が確認された。

改質リグニン含有の MS 剤を添加することで、不飽和ポリエステル樹脂の硬化が可能になるとともに、MS の添加量 10% のマトリックス樹脂適用 CFRP では、MS 剤無添加の不飽和ポリエステル CFRP と比較して、曲げ強度が約 20% 増加する事が確認された。一方、20% 以上の MS 添加量では CFRP の強度が減少していく傾向が見られた。本メカニズム解明については別途検討していく必要がある。また、図 21 に示している曲げ試験片の応力-ひずみ曲線からは、MS 添加量 20% 以上で機械的強度は低下するものの、延性傾向が強くなり、なかなか試料破断に至らない傾向が見られた。実際の試験片は脆性破壊することなく、全て延性破壊モードであったことから、CFRP の製造条件の最適化を図る事で、マトリックス樹脂部と炭素繊維界面の密着強度改善が出来れば、更なる MS 添加不飽和ポリエステル CFRP の強度改善が期待されると考えている。

これらの検討結果から、インフュージョン成形工法での A4 サイズ相当の CFRP 試料作製が可能となり、ケミカルリサイクル性評価試料として表 11 に示した CFRP 試料 5 種を京都府立大学に提供して、本年度の目標を達成した。

以上の様に、改質リグニン添加による不飽和ポリエステル樹脂の硬化の実現やその CFRP 化を可能にした事は、現状の FRP 商品市場で低コスト・汎用商品の代表格である不飽和ポリエステル樹脂の改質の可能性を実証した事を意味する。

今回、改質リグニン MS 剤で CFRP における強度改善効果が確認されたが、今後ケミカルリサイクル技術での実証が進みリサイクルプロセスが確立できれば、FRP 商品に及ぼす影響は多大であると期待される。更には、改質リグニン添加ポリウレタン及びフェノール樹脂での CFRP 化に関しても検討を継続しており、令和 6 年度にその CFRP 化を目指す計画である。

表 11 MS 添加不飽和ポリエステル CFRP 成形結果

* CFRP の成形は、インフュージョン成形法を適用

試料 NO.	14	9	11	12	10
MS 剤改質リグニン率(%)	0	20	20	20	20
MS 剤添加率(%)	0	10	20	30	20
硬化剤添加率(%)	2	2	2	2	4
不飽和ポリエステル樹脂 調製内訳	主剤(100)+硬化促進剤((0.5)+硬化剤(2~4)+改質リグニン MS 剤(0~30)				
CFRP 硬化条件	55°C-10 分	55°C-15 分	55°C-15 分	55°C-15 分	55°C-10 分
曲げ最大点応力(MPa)	300	360	290	123	251
曲げ弾性率(GPa)	16	19	27	19	27
破壊モード	延性破壊	延性破壊	延性破壊	延性破壊	延性破壊



図 19 MS 添加不飽和ポリエステル CFRP

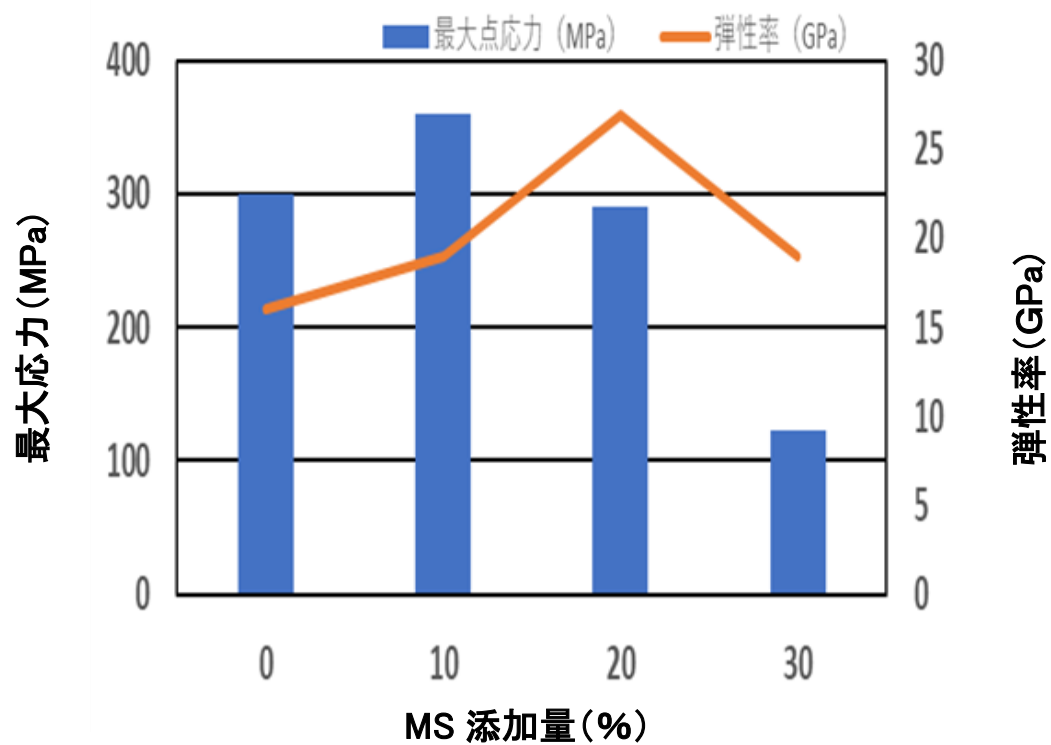


図 20 主剤に対する MS 添加量と CFRP 曲げ強度

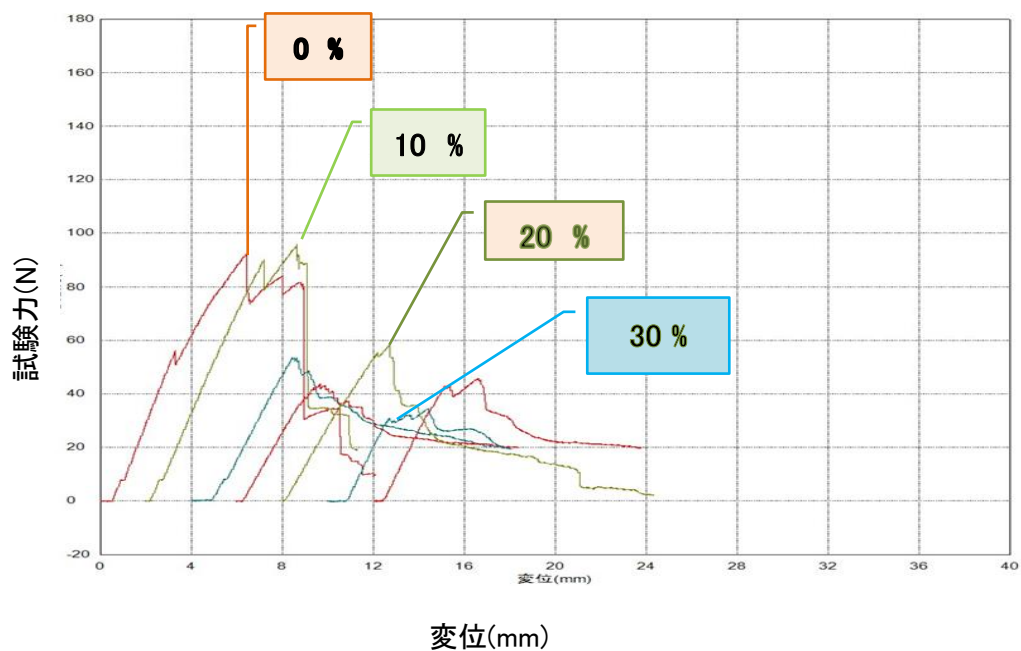


図 21 各 MS 添加量での MS 添加不飽和ポリエステル CFRP の応力-ひずみ曲線

3 まとめ

研究項目:「CFRP のケミカルリサイクル技術の構築の新規反応媒体の探索」(京都府立大学担当)では、昨年度の研究成果から、改質リグニン含有 CFRP の樹脂分解に対して効果的であった、DBU 類縁体 A、F、G の3種類について、さらなる樹脂分解に関する検討を行った。すなわち、3 種類の DBU 類縁体を用いて、改質リグニン含有率の異なる各種 CFRP を所定時間分解処理し、その樹脂分解率を比較した。その結果 DBU 類縁体 F は、CFRP 中のリグニン含有率が低い試料でも、また短時間処理の場合で他の DBU 類縁体と比べて高い樹脂分解率を示した。以上の結果より、3 種類の候補反応媒体の中から、CFRP マトリックス樹脂を分解可能な新規反応媒体として、DBU 類縁体 F を絞りこむことができ、「CFRP のマトリックス樹脂を分解可能な新規反応媒体を1つに絞り込む」という本年度の目標を達成できた。

研究項目:「CFRP のケミカルリサイクル技術の構築の新規反応媒体の分解条件の最適化」(京都府立大学担当)では、DBU 類縁体 F を用いて様々な処理条件について検討を行った結果、100℃処理の場合、GL200 含有 CFRP が GL600 含有 CFRP よりも高い樹脂分解率を示した。80℃処理では、DBU 類縁体 F と GL200 含有 CFRP の組み合わせにおいて、高い樹脂分解率であった。しかしながら、樹脂開発においては GL200 よりも GL400、GL600 が機械的物性や CFRP 加工性の観点で優れていることから、バイオベース素材としての改質リグニン、および分解媒体としての DBU 類縁体 F それぞれの特性を最大限に利用して、極限環境下でも活用できる新しい CFRP のケミカルリサイクルシステムについての検討を重ねる必要があると考えられる。また、改質リグニン含有マトリックス樹脂のみを DBU 類縁体 F を用いて処理した結果、マトリックス樹脂または改質リグニンから分解を受けた何らかの低分子化合物が可溶化していることが分かり、樹脂モノマーの回収の可能性を見出した。

研究項目:「ケミカルリサイクルに適する CFRP のデザインングのバイオベース CFRP のデザインング」(森林総合研究所、宮城化成担当)では、分子量の異なる改質リグニン(GL)3 種(GL200, GL400, GL600)を用いて検討を行った。その結果、改質リグニン添加熱硬化エポキシ樹脂の成形性の観点から、GL600 の適用が最も有利であることが確認された。CFRP 成形体の機械的物性値は、マトリックス樹脂中の改質リグニンの分子量が増す程(GL200→GL400→GL600)、最大点曲げ応力は増加傾向にあり、弾性率は GL600 添加樹脂で若干減少傾向を示す一方最大点歪は若干増加傾向を示した。すなわち、改質リグニン GL600 でマトリックス樹脂の加工性が大幅に改善され、そこから得られた CFRP の機械的物性も良好であることが確認できた。この結果をもとに、GL600 添加量 CFRP を追試作り CFRP をケミカルリサイクル性評価用試料として提供することで、「改質リグニン系エポキシ樹脂では、バイオマス度の異なるマトリックス樹脂の物理特性にバリエーションをもたらせた改質リグニンへの展開を検討しケミカルリサイクルに適した系を見出して評価する」という本年度の目標を達成できた。

また、改質リグニン MS シリーズを調製し、不飽和ポリエステルとの組み合わせを検討した。MS シリーズは不飽和ポリエステルの硬化を妨げない事を確認した上で、改質リグニン添加不飽和ポリエステル樹脂による CFRP 化を検討して機械的物性への影響を評価した。最終的には A4 サイズ相当の CFRP の試作に成功し、リサイクル性評価用 CFRP 試料を京都府立大学に提供し、「樹脂においては、不飽和ポリエステル、ポリウレタン樹脂などへの展開を開始する」という本年度の目標を達成できた。

これらの決壊は、現状の FRP 商品市場で低コスト・汎用商品の代表格である不飽和ポリエステル樹脂の改質の可能性を実証した事を意味する。今後ケミカルリサイクル技術での実証が進みリサイクルプロセスが確立できれば、FRP 商品に及ぼす影響は多大であると期待される。更には、改質リグニン添加ポリウレタン及びフェノール樹脂での CFRP 化に関しても検討を継続しており、令和 6 年度にその CFRP 化を目指す計画である。

4 添付資料

宇宙航空科学技術推進委託費
宇宙航空脱炭素技術等創出プログラム
CFRPの真空対応ケミカルリサイクルシステム
令和5年度 第1回 推進会議 開催要項

研究代表 宮藤 久士 (京都府立大学)

1. 主 旨：

宇宙航空科学技術推進委託費 宇宙航空脱炭素技術等創出プログラムにおける課題「CFRPの真空対応ケミカルリサイクルシステム」各参画機関におかれましては、本年度も順調に研究がスタートしたものと存じます。本会議におきましては、今年度の研究目標・研究計画について、参画機関間で意思統一を行うことを目的としております。ご多忙中とは存じますが、ご参集いただきますよう、宜しくお願いいたします。

日時：令和5年5月23日（火）15:00～16:20

2. 場所：オンライン（Teams）

3. 参集範囲：京都府立大学、森林研究・整備機構、株式会社宮城化成、文部科学省（委託元）

4. 会議時間：オンライン入室時間 14:45～15:00 会議開始 15:00

1) 開始 挨拶と紹介

開会のあいさつ	宮藤久士	15:00～15:05
研究概要と研究目標	宮藤久士	15:05～15:15

2) 課題毎の本年度の研究計画

(1) CFRPのケミカルリサイクル技術の構築 新規反応媒体の探索 (京都府立大学)	15:15～15:30
---	-------------

(2) ケミカルリサイクルに適するCFRPのデザインング (森林研究・整備機構) (株式会社宮城化成)	15:30～15:50
--	-------------

3) 総 評	15:50～16:10
--------	-------------

4) 事務連絡	16:10～16:20
---------	-------------

5) 閉 会	16:20
--------	-------

= ウェブ会議入室方法 =

以下のリンクからTeamsにご入室ください

https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%3ameeting_YzhjN2Y0MjEtZmI1Zi00MjI4LWFkOGYtM2RhOWRmYjdiZmU3%40thread.v2/0?context=%7b%22Tid%22%3a%22e5286ef1-6d69-4d44-b228-56ebcdcf1fb4%22%2c%22Oid%22%3a%22ea8e0b80-d9ab-4b40-916d-06c9d69d9ee4%22%7d

宇宙航空科学技術推進委託費
宇宙航空脱炭素技術等創出プログラム
CFRPの真空対応ケミカルリサイクルシステム
令和5年度 第2回 推進会議 開催要項

研究代表 宮藤 久士 (京都府立大学)

1. 主 旨：

宇宙航空科学技術推進委託費 宇宙航空脱炭素技術等創出プログラムにおける課題「CFRPの真空対応ケミカルリサイクルシステム」各参画機関におかれましては順調に研究が推進されているものと存じます。本会議におきましては、令和5年度の研究について進捗確認と情報交換を行うことを目的としております。ご多忙中とは存じますが、ご参集いただきますよう、宜しくお願いいたします。

2. 日時：令和5年10月11日（水）13:30～14:30

3. 場所：オンライン（Teams）

4. 参集範囲：京都府立大学、森林研究・整備機構、株式会社宮城化成、文部科学省（委託元）

5. 会議時間：オンライン入室時間 13:15～13:30 会議開始 13:30

1) 開始 挨拶と紹介

開会のあいさつ	宮藤久士	13:30～13:35
研究概要と研究目標	宮藤久士	13:35～13:45

2) 課題毎の研究進捗状況報告

(1) CFRPのケミカルリサイクル技術の構築 新規反応媒体の探索 (京都府立大学)	13:45～13:57
(2) ケミカルリサイクルに適するCFRPのデザインング (森林研究・整備機構) (株式会社宮城化成)	13:57～14:12

3) 総 評 14:12～14:25

4) 事務連絡 14:25～14:30

5) 閉 会 14:30

= ウェブ会議入室方法 =

以下のリンクからTeamsにご入室ください

https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%3ameeting_YiFiZDBmNmQtM2M0MS00NTczLWJiYmYtZGQ3OGY5NmUvNzQy%40threead.v2/0?context=%7b%22Tid%22%3a%22e5286ef1-6d69-4d44-b228-56ebcdcf1fb4%22%2c%22Oid%22%3a%22ea8e0b80-d9ab-4b40-916d-06c9d69d9ee4%22%7d

宇宙航空科学技術推進委託費
宇宙航空脱炭素技術等創出プログラム
CFRPの真空対応ケミカルリサイクルシステム
令和5年度 第3回 推進会議 開催要項

研究代表 宮藤 久士 （京都府立大学）

1. 主 旨：

宇宙航空科学技術推進委託費 宇宙航空脱炭素技術等創出プログラムにおける課題「CFRPの真空対応ケミカルリサイクルシステム」各参画機関におかれましては順調に研究が推進されているものと存じます。本会議におきましては、令和5年度の研究について情報交換を行い、本年度の研究成果の取りまとめに向けて参画機関間で意思統一を行うことを目的としております。ご多忙中とは存じますが、ご参集いただきますよう、宜しくお願いいたします。

2. 日時：令和6年2月20日（火）13:30～14:50

3. 場所：オンライン（Teams）

4. 参集範囲：京都府立大学、森林研究・整備機構、株式会社宮城化成、文部科学省（委託元）

5. 会議時間：オンライン入室時間 13:15～13:30 会議開始 13:30

1) 開始 挨拶と紹介

開会のあいさつ	宮藤久士	13:30～13:35
---------	------	-------------

研究概要と研究目標	宮藤久士	13:35～13:45
-----------	------	-------------

2) 課題毎の研究進捗状況報告

(1) CFRPのケミカルリサイクル技術の構築 新規反応媒体の探索 (京都府立大学)	13:45～14:00
---	-------------

(2) ケミカルリサイクルに適するCFRPのデザインング (森林研究・整備機構) (株式会社宮城化成)	14:00～14:20
--	-------------

3) 総 評	14:20～14:40
--------	-------------

4) 事務連絡	14:40～14:50
---------	-------------

5) 閉 会	14:50
--------	-------

＝ ウェブ会議入室方法 ＝

以下のリンクからTeamsにご入室ください

https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%3ameeting_YjY0OWUyM2EtNiJkOS00OTEyLWE5OGQrODAxYjNkMGExZWJm%40thre%20ad.v2/0?context=%7b%22Tid%22%3a%22e5286ef1-6d69-4d44-b228-56ebcdcf1fb4%22%2c%22Oid%22%3a%22ea8e0b80-d9ab-4b40-916d-06c9d69d9ee4%22%7d

学会等発表実績

委託業務題目「CFRP の真空対応ケミカルリサイクルシステム」

機関名 京都府立大学、森林総合研究所、宮城化成(受託機関)

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果(発表題目、口頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所(学会等名)	発表した時期	国内・外の別
PEG 改質リグニン含有 CFRP のケミカルリサイクルにおける反応雰囲気の影響、口頭	橋本朱右, 宮藤久士, 細谷隆史, 岩田伸一, 小山昭彦, ティティネー, 山田竜彦	第 74 回日本木材学会大会	2024 年 3 月 13 日	国内
バイオベース CFRP の宇宙でのケミカルリサイクル、口頭	宮藤久士	第 38 回木質利用シンポジウム	2024 年 3 月 19 日	国内
バイオベース CFRP と真空対応型ケミカルリサイクル技術の開発	宮藤久士、山田竜彦	第 2 回宇宙木材利用シンポジウム	2024 年 3 月 21 日	国内

(注)発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。