

平成29年防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

成果報告書

「構造軽量化を目指した接着部の信頼性および強度向上に関する研究」

平成30年5月

機関名：学校法人幾徳学園神奈川工科大学

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、学校法人幾徳学園神奈川工科大学が実施した平成 29 年度「構造軽量化を目指した接着部の信頼性および強度向上に関する研究」の成果を取りまとめたものです。

目 次

1. 委託業務の目的	1
1. 1 研究開始時に設定した研究目標の達成度	3
a. 「CNT 樹脂薄膜」の基礎データ取得	3
b. 「炭素繊維/CNT 樹脂」による CFRP の開発・評価	6
c. 「炭素繊維/CNT 樹脂+樹脂」による傾機能型 CFRP の開発・評価	8
d. 「CNT 樹脂」による二次接着プロセスの開発・改善	16
e. 界面強度向上のメカニズム把握	20
1. 2 研究課題終了後の将来性	25
1. 3 副次的成果や目標を超える成果	26
1. 4 論文、特許、学会発表等の成果	27
1. 5 研究実施体制とマネジメント	28
1. 6 経費の効率的執行	29
2. 平成 29 年度（報告年度）の実施内容	30
2. 1 平成 29 年度の実施計画	30
① 「炭素繊維/CNT 樹脂+樹脂」による傾機能型 CFRP の開発・評価	30
② CNT 樹脂薄膜の改良（再委託先：株式会社 N. A. C. T.）	30
③ 「炭素繊維/CNT 樹脂+樹脂」傾斜機能型 CFRP の改良（再委託先：株式会社 N. A. C. T.）	31
④ CNT 含有樹脂による二次接着プロセスの開発（再委託先：株式会社 N. A. C. T.）	31
⑤ プロジェクトの総合的推進	31
2. 2 平成 29 年度の研究実施日程	32
2. 3 平成 29 年度の研究成果の説明	33
① 「炭素繊維/CNT 樹脂+樹脂」による傾斜機能型 CFRP の開発・評価	33
a. CNT 樹脂薄膜の改良・評価	33
b. 「炭素繊維/CNT 樹脂」傾斜機能型 CFRP の改良評価	44
c. CNT 樹脂含有接着剤による二次接着能力の評価	75
d. 界面解析シミュレーションの改良と CNT 樹脂による強度向上のメカニズムの解明	124
② CNT 樹脂薄膜の改良（再委託先：株式会社 N. A. C. T.）	136
a. 剥離紙の改良	136
b. キョーテックでの薄膜化	137
c. N. A. C. T. での薄膜化	137
③ 「炭素繊維/CNT 樹脂+樹脂」傾斜機能型 CFRP の改良（再委託先：株式会社 N. A. C. T.）	141
④ CNT 含有樹脂による二次接着プロセスの開発（再委託先：株式会社 N. A. C. T.）	143
⑤ プロジェクトの総合的推進	148
3. 成果の外部への発表及び活動	149
4. まとめ、今後の予定	149
参考文献	150

1. 委託業務の目的

CFRP（炭素繊維強化複合材料）の炭素繊維と樹脂間の接着特性を改善する。これにより積層材である CFRP の破壊靱性と層間強度を向上させる。この基礎技術の開発により CFRP 構造の軽量化に有効な材料技術を取得することを目的とする。

具体的な手段としては、CNT（カーボンナノチューブ）の粉末を樹脂に分散させた薄層（CNT＋樹脂：以降 CNT 樹脂と称す）を炭素繊維表面に形成することで、接着強度および靱性を改善する。そのために、CNT 樹脂層の膜厚、CNT 含有比率、均一度合などの諸量について、CFRP の力学特性を最も向上させ得る適正化を行う。さらにこの（炭素繊維/CNT 樹脂）層の表面に樹脂のみの層を重ねることで、樹脂部の強度・剛性を傾斜機能化する。これにより、繊維～樹脂間の荷重伝播を緩やかにして荷重伝達効率を高め、部材の耐荷能力を向上することで CFRP の層間強度の向上を可能とする技術を開発する。併せて、CFRP 間の二次接着部の接着剤についても CNT 樹脂を適用することにより、接着部の破壊靱性の向上を目指す。すなわち、CNT 樹脂層の適正化により、層間破壊靱性および二次接着面靱性の向上を図り、CNT 樹脂/樹脂の傾斜機能化により層間強度の向上を図ることを目的とする。

成果として下記を目標とする。なお、この目標は本研究と同じ繊維と、CNT を含まない樹脂を用いた CFRP に対し、本研究成果を適用した場合を比較した数値目標である。二次接着の目標は接着材 FM300 クラスの力学特性との比較数値目標である。

- ・ CFRP の層間破壊靱性／せん断強度：2 倍程度向上を目標とする。
- ・ CFRP 間の二次接着面靱性：2 倍程度向上を目標とする。

具体的な研究項目は以下の通りとする。なお、これらの各研究は得られた結果により適宜繰り返される事を前提とする。

a. 「CNT 樹脂薄膜」の基礎データ取得

CNT 樹脂を用いて生成した薄膜のデータを取得する。すなわち、異なる CNT の樹脂 Wt%における膜厚、密度、SEM 等による CNT の分布状態、および力学特性として弾性率、強度を取得する。これらは、b. 項で実施する『炭素繊維/CNT 樹脂による CFRP 開発』において、CNT 樹脂の諸量が力学特性に与える影響を把握するための基礎データとなる。さらに、e. 項のシミュレーションによる『界面強度向上のメカニズム把握』の解析用基礎データとしても用いる。

b. 「炭素繊維表面/CNT 樹脂」による CFRP の開発・評価

炭素繊維と CNT 樹脂薄膜を用いて 1 層のプリプレグを生成し、それを重ねて CFRP 積層板を成形する。また、異なる膜厚や密度の CNT 樹脂薄膜を用いたプリプレグについても CFRP 積層板を成形する。これらについて繊維体積含有率（Vf）、空隙率および板厚を各々確認し成形性を評価する。さらに、CFRP の力学特性として弾性率、強度、靱性値を評価する。併せて、CNT

樹脂薄膜がこれらの力学特性へ与える影響の評価基準とするために、エポキシ樹脂のみを用いた CFRP についても弾性率、強度、靱性値を取得する。

なお、b. 項を実施しながら CNT 樹脂薄膜の最適化の検討を行う。従って、b. 項の結果によっては、a. 項の作業の追加が発生する。この一連の作業により、CNT 樹脂の膜厚、密度と CFRP の力学特性との関係についてのデータを蓄積する。

c. 「炭素繊維表面/CNT 樹脂+樹脂」による傾斜機能型 CFRP の開発・評価

炭素繊維と CNT 樹脂薄膜を用いて 1 層のセミプレグを生成し、その上にエポキシ樹脂薄膜を重ね、「繊維/CNT 樹脂+樹脂」プリプレグを作る。このプリプレグを用いて CFRP 積層板として成形する。この工程で本積層板の成形性を確認する。すなわち、傾斜機能化を行う当該プリプレグを用いて成形した場合の、各エポキシ樹脂薄膜層厚における繊維体積含有率 (V_f)、空隙率、CNT 分散度合い、および板厚を確認し成形性を評価する。また、異なるエポキシ樹脂薄膜層の厚さによって傾斜機能化された CFRP の力学特性として、弾性率、強度、靱性値を評価する。また、a. 項で取得した CNT 薄膜のデータと、本 CFRP の力学特性を評価・検討して CNT 薄膜の最適値を設定する。

d. 「CNT 樹脂」による二次接着プロセスの開発・改善

成形品同士の接着を行う場合、接着フィルムやマット材などの既存接着材の表面に CNT 樹脂の薄膜を形成して傾斜機能化した後に、接着する手法の開発・改善を行う。すなわち、既存接着材表面上に形成する厚さの異なる CNT 樹脂薄膜を用いた接着部について、各々の接着面力学特性を評価する。液状接着材の場合は、接着剤に含有させる CNT 樹脂の Wt% を基準として接着面力学特性を評価する。力学特性として靱性値および疲労特性を評価する。

e. 界面強度向上のメカニズム把握

複合材解析ソフトによる破壊解析シミュレーションを行う。取得した力学特性との比較により、解析手法の高精度化を行い、要すれば解析上の新たな破壊クライテリア等の提言を行う。すなわち、a. 項で取得した CNT 樹脂の特性などを参考に、供試体の物性値を用いて FEM (有限要素解析) モデルを作成する。また繊維と樹脂間とを結合する要素特性などをパラメトリックに変更しながら、強度試験で得られた値とシミュレーション結果を近づける過程を通じ、界面および層間の強度向上メカニズムを把握する。

これらのシミュレーション手法の改善によって、将来の成形、接着強度推算の確実性を高め、また、性能改善に最も有効なパラメータを抽出し、設計・解析の信頼性向上に資する知見を取得する。

これらを実現するために、神奈川工科大学では設計解析手法に関わる技術開発および研究全体の総合的推進を行う。また、株式会社 N. A. C. T. では力学特性を向上させる CFRP 成形手法に関する技術開発を実施する。そのために外部の専門家・有識者による計画および結果の評価を適宜行い、本研究開発を効率的に進捗させる体制を採る。

1. 1 研究開始時に設定した研究目標の達成度

本研究はCFRPの樹脂層を傾斜機能化することによって下記の目標を達成する事である。この目標は傾斜機能型CFRPと同じ繊維と、CNTを含まない同じ樹脂を用いたCFRPに対し、力学特性を比較した数値目標である。二次接着の目標も傾斜機能化した接着材と適用していない接着材の力学特性を比較した数値目標である。

- ・CFRPの層間破壊靱性／せん断強度：2倍程度向上を目標とする。
- ・CFRP間の二次接着面靱性：2倍程度向上を目標とする。

●傾斜機能型CFRPの概念： 傾斜機能型CFRPの概念を図1-1に示す。従来のCFRPでは炭素繊維（CF）と樹脂との強度・弾性率が大きく異なる。荷重が加わるとCFRP積層板の内部に発生する応力はCFと樹脂とは大きく異なるため、CFと樹脂との間に発生する応力はその差分が働く事になる。この応力がCFと樹脂との接着許容応力を超えると層間破壊が起き、CFRP積層板としての強度が大幅に低下する。また、弾性率の差異は応力集中も発生させるため、当該部位に発生する応力は更に高くなり、これもCFRP板の許容応力を下げる要因となる。そこで、強度・弾性率の高いCNT樹脂層と従来の樹脂層とを重ねる事で樹脂層を傾斜機能化し弾性率を段階的に変化させる事で、層間応力を低下させ、もってCFRP積層板の強度と靱性を向上させる事を目指す概念である。

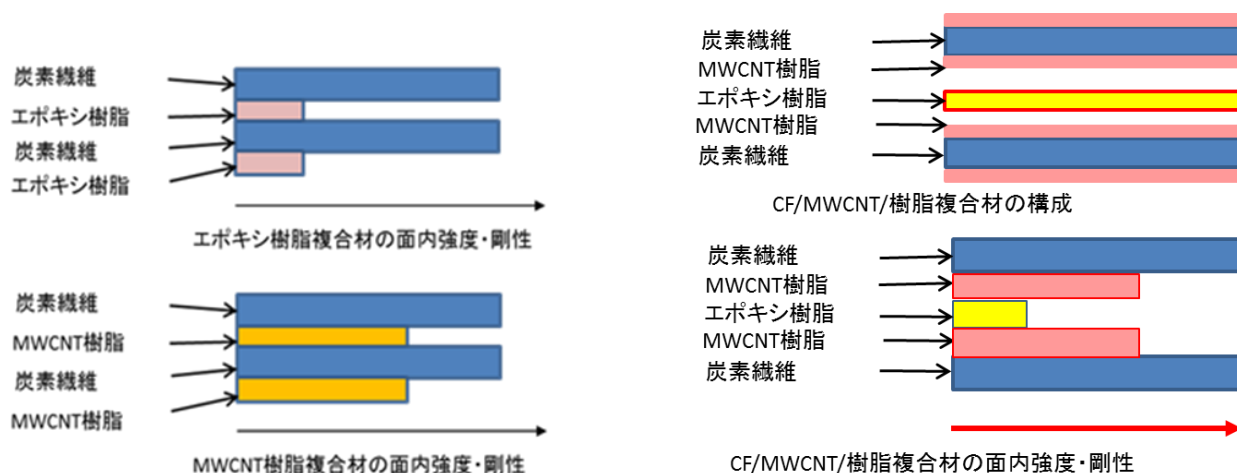


図1-1 「CF/樹脂、CF/CNT樹脂」および「CF/CNT+樹脂」による傾斜機能型CFRPの面内特性概念

a. CNT樹脂薄膜の基礎データ取得（開発・評価）

傾斜機能型CFRPを形成する重要な要素であるCNT樹脂膜を開発し評価した。CNTを樹脂に均一に分散させる事が大きな課題であり、多くの試みが研究者によって報告されているが、均一な薄膜でかつCNTの分散が均一な膜の製作に成功した事は報告されていない。そこで、平成27年度はCSCNT（カップスタックCNT）とMWCNT（マルチウォールCNT）の2種のCNTについて試作及び評価を行った。

① **カップスタック型 CNT**： CSCNT は、GSI クレオス社製カルベール®をエポキシ樹脂に混ぜてシート状にしたものを使用した。この製品は CNT 薄膜として形成された形態で購入する物である。化学的な活性の高いグラフェンシートの端部がナノチューブ表面に露出しているため、樹脂とナノチューブの結合が他のナノチューブに比べ優れていると考えられる事が特徴とされている。CSCNT 樹脂シート目付が（単位面積あたり重量 $\div$ 膜厚）]異なる三種類を用いた CFRP を成形して力学特性も評価した。

② **マルチウオール型 CNT**； MWCNT は、日東紡マテリアルズから CNT 樹脂溶液の形態で供給される。この MWCNT 樹脂溶液を製膜専門企業に支給して薄膜化を行った。所定の膜厚となるようにスクリーン厚を設定し、スクリーンの穴を通過して剥離紙上に CNT 樹脂を塗布するスクリーン印刷手法方式である。これにより樹脂の膜厚制御と、CNT 樹脂膜を剥離紙上に均一に塗布する二つの目的を同時に果たす事を目指した。

●**CNT 樹脂膜の評価**： 既成の CNT 樹脂膜である (CSCNT) と、CNT 樹脂液で購入し成膜した MWCNT 樹脂膜の分布状況の比較を図 1－2 示す。既成の CSCNT 樹脂膜は厚さ分布が一樣でなく、図 1－3 に示すとおりの CNT の凝集も多く観察された。一方、MWCNT 樹脂液から成膜した物は目標の 10 μm を実現でき、かつ CNT の凝集も少なく CNT の分布も一樣である事が確認できた。MWCNT 樹脂膜の SEM 観察結果を図 1－4 に示す。CNT の凝集もなく樹脂内で分散が均一である事が確認できた。これらの観測結果から、CNT を樹脂内に分散させた原液を用いて、さらに薄膜化する加工をしても CNT の分散が保たれている事が確認できた

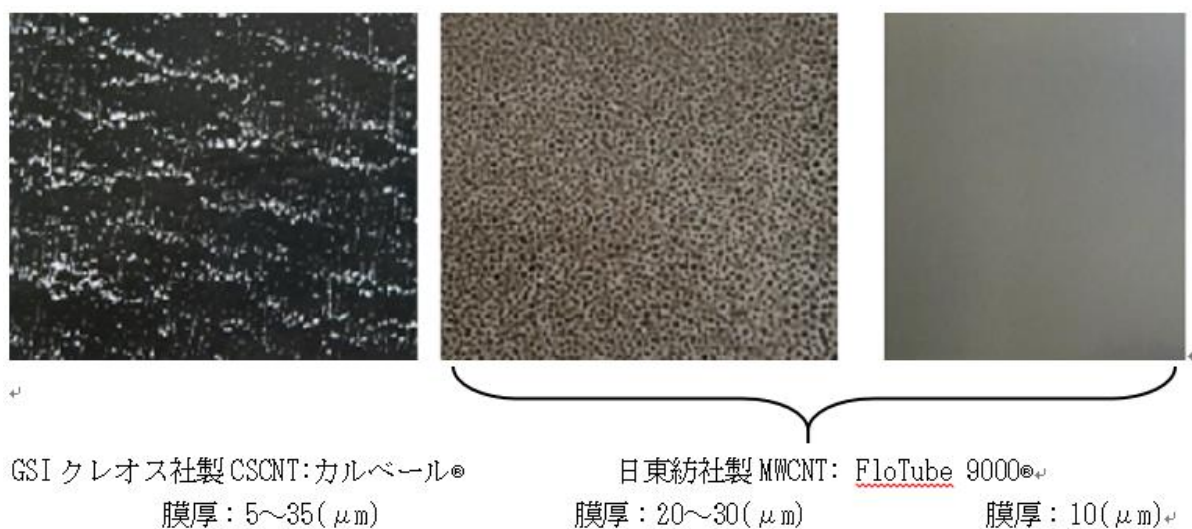


図 1－2 既成品CSCNT樹脂膜とMWCNT樹脂液から成膜したCNT樹脂膜の比較

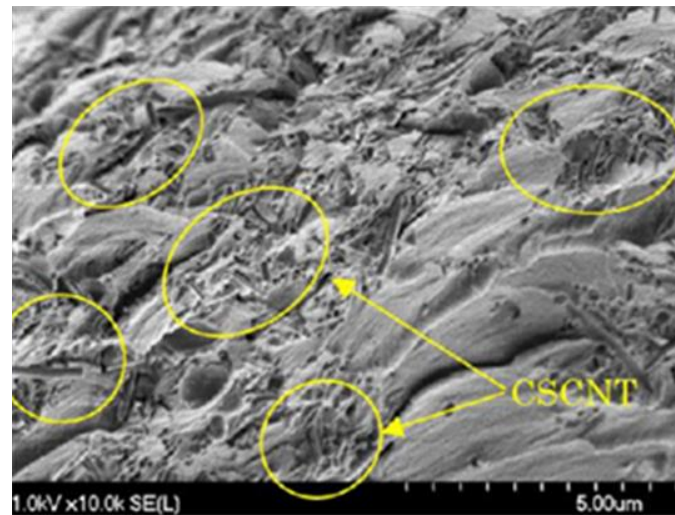
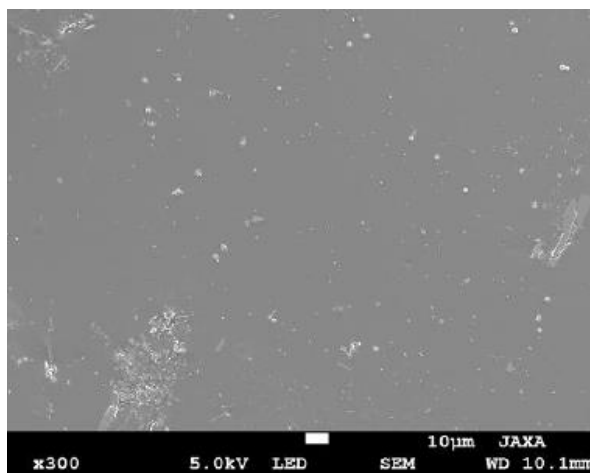
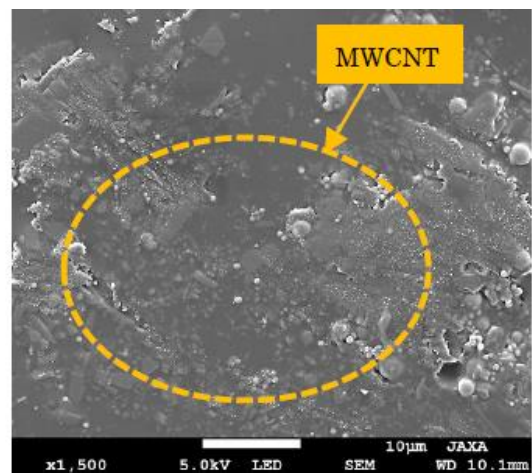


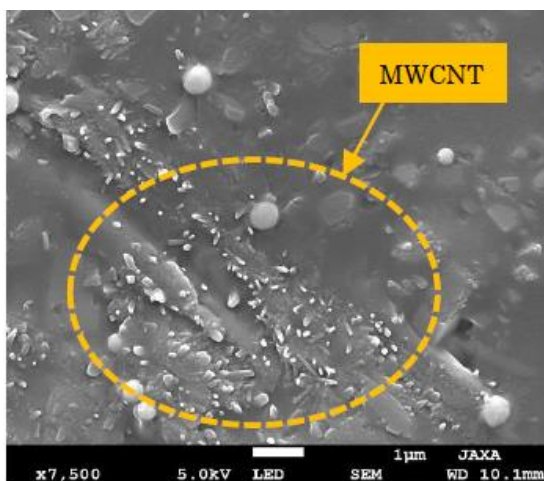
図 1－3 CSCNT 樹脂膜 SEM 画像 (CNT 分布が密な部位)



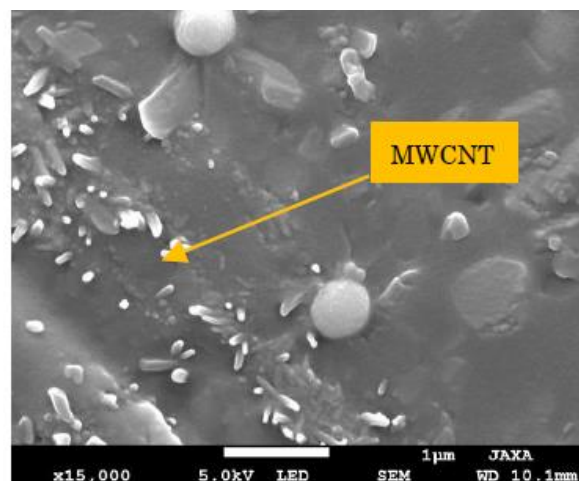
(1) MWCNT 樹脂シートの外観 (×300)



(2) 左図拡大 MWCNT が広汎に見える



(3) MWCNT の拡大

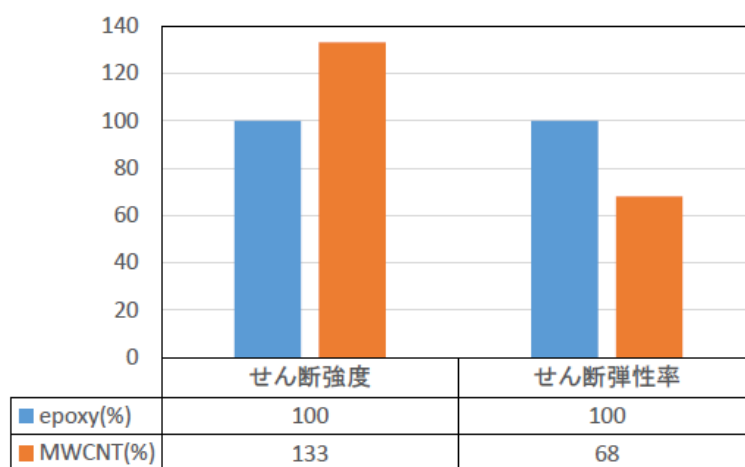


(4) 左図拡大

図 1－4 CNT 樹脂膜内の MWCNT の SEM 観測結果

樹脂の力学特性取得のため、MWCNT 樹脂を成形した板および樹脂単体による板を用いて力学特性を取得し層間の破壊メカニズム解析の資とした。比較結果を図 1－5 に示す。なお、平成 28 年度以降は良好な結果を示し、かつ、任意の膜厚の CNT 樹脂膜を製作できる MWCNT のみを用いる事とした。

●CNT 樹脂と樹脂単体のせん断特性比較； CNT 含有により樹脂のせん断強度は 30%超の増加がある反面、弾性率は 30%の低下となっている。CNT 含有はせん断荷重に対しては樹脂内結合力を増やす影響を与える結果となった。また、せん断特性は非線形が大きく、1000 μ と 5000 μ の歪みに基づいてせん断弾性率を求めている。



(基準 epoxy の値：せん断強度(100%=22.7 MPa)、せん断弾性率(100%=1.31 MPa))

図 1－5 MWCNT 樹脂板と樹脂単体のせん断特性比較

b. 「炭素繊維/CNT 樹脂」による CFRP の開発・評価

① (CF/樹脂+CNT 樹脂)CFRP の開発・評価： 「CF (炭素繊維) /CNT 樹脂」 CFRP の評価に先立ち、平成 27 年度は既存のプリプレグの層間に CNT 樹脂膜を挟んで傾斜機能型とした (CF/樹脂+CNT 樹脂)CFRP を成形し、プリプレグ CFRP の力学特性と比較評価した。使用したプリプレグは三菱レーヨン(株)の：TR 350E150S (130° 硬化型 高強度繊維／エポキシ：炭素繊維 TR50S12L) である。CNT 樹脂は前述の 3 種類の膜厚 CSCNT を適用した。結果を図 1－6 に示す。繊維含有率がそれぞれ異なるため正確な比較には補正が必要であるが、CNT 樹脂による強度・弾性率向上の可能性が確認できた。破壊靱性値は CSCNT (65g/mm²) の樹脂膜を用いた CFRP とプリプレグ CFRP と比較した結果、モード I (面外開口型：DCB 試験) では 60%と低下したが、モード II (面内せん断型：ENF 試験) では 200%と倍増した。供試体の数や板厚が異なるなど条件の差異があるが、靱性値に関しても特性向上の可能性を確認した。

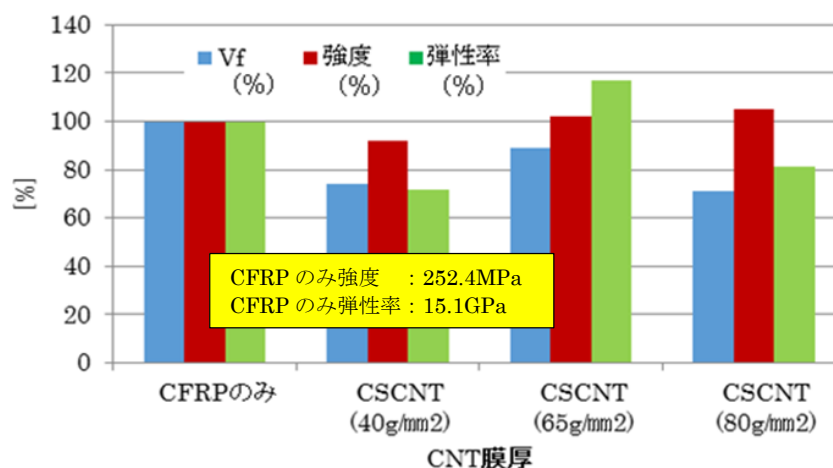
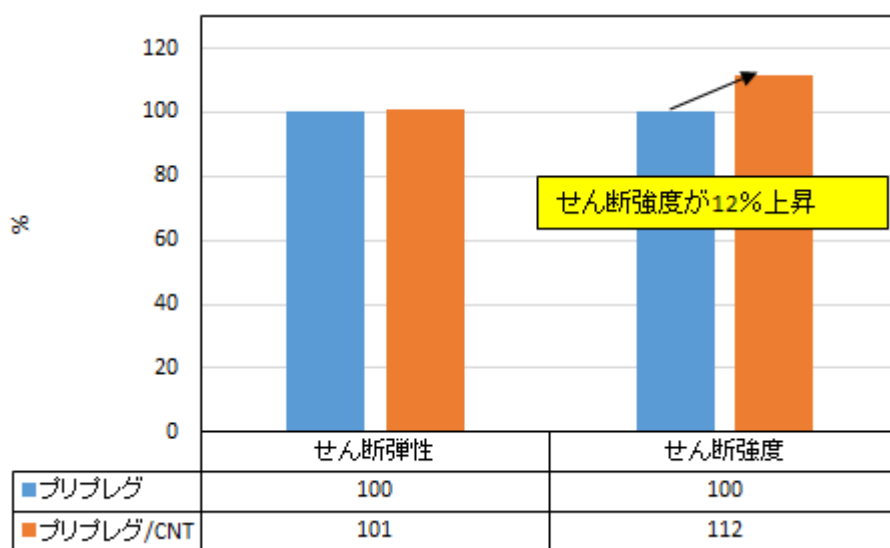


図 1-6 CNT 樹脂による力学特性向上の可能性

平成 28 年度も引き続き、既存のプリプレグの層間に MWCNT 樹脂膜を挟んで傾斜機能型とした (CF/樹脂+MWCNT)CFRP を成形し、CNT を含まないプリプレグ CFRP と比較評価した。結果を図 1-7 に示す。同じ基準で比較するために Vf(繊維含有率)で補正しているが、せん断特性の補正は本研究によって得た手法に則り行った。CNT の含有により、せん断強度は約 12%向上し、せん断剛性は変化しない結果となった。



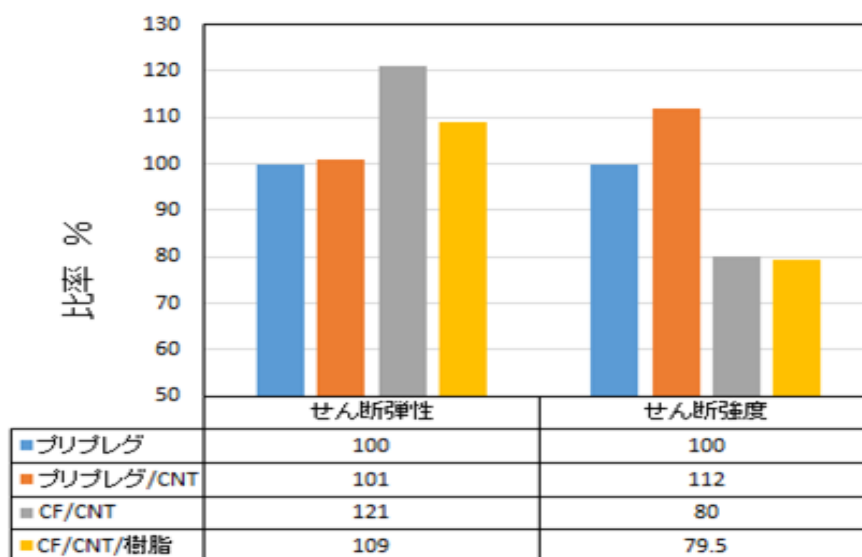
(基準プリプレグの値：弾性率(100%=3.41GPa)、強度(100%=134MPa))

図 1-7 (プリプレグ/MWCNT)CFRP のせん断強度・せん断弾性率 比較 (Vf=53.2%基準)

②(CF/CNT 樹脂)CFRP の開発・評価： 平成 28 年度に CF と CNT 樹脂フィルムとを重ね (CF/CNT 樹脂) CFRP として成形した CFRP を評価した。CNT は MWCNT を用いている。使用した炭素繊維は三菱レーヨン(株)の PYROFIL 高強度型繊維である TR50S12L を用いた。この繊維は比較対象プリプレグの繊維同じ物である。比較評価は次項の「炭素繊維表面/CNT 樹脂+樹脂」による傾斜機能型 CFRP の開発・評価と併せて示す。

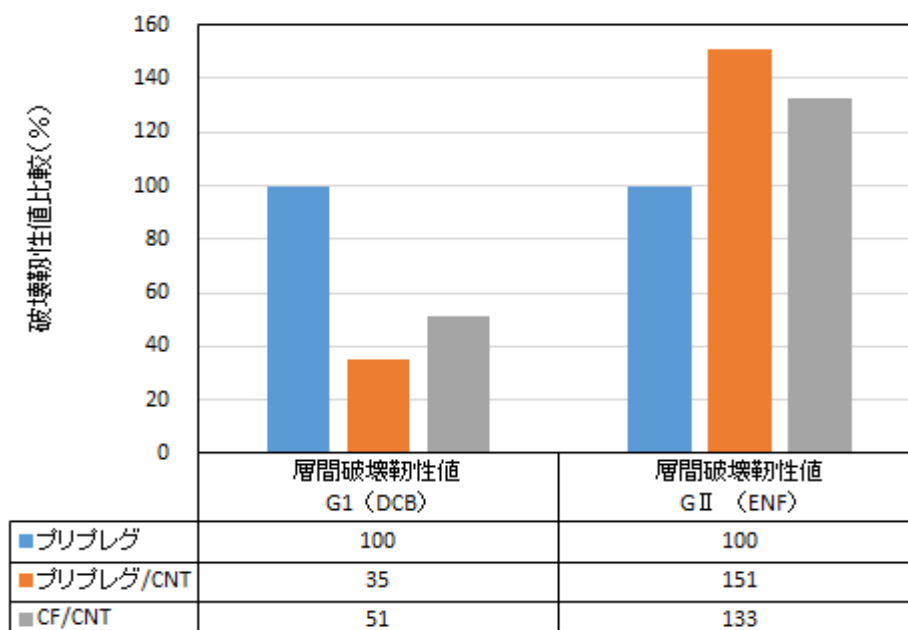
c. 「炭素繊維表面/CNT 樹脂+樹脂」による傾斜機能型 CFRP の開発・評価

① 平成 28 年度からこの材料の製作を始めた。成形は(CF/CNT 樹脂)プリプレグを製作し、そのプリプレグ・シートを 24 枚積層するが、積層時に各層の間に MWCNT 樹脂膜を挟み、(CF/CNT 樹脂+樹脂)の構成とし、その後に加圧・加熱プロセスを経て CFRP 化する。この(CF/CNT 樹脂+樹脂)CFRP のせん断特性および破壊靱性を取得しプリプレグ CFRP、(CF/CNT) CFRP 及び(プリプレグ/CNT)CFRP と比較評価した結果を図 1－8 に示す。また、破壊靱性値の比較を図 1－9 に示す。



(基準値は図 1－7 に同じ)

図 1-8 各材料のせん断弾性・強度の比較 (プリプレグ基準)



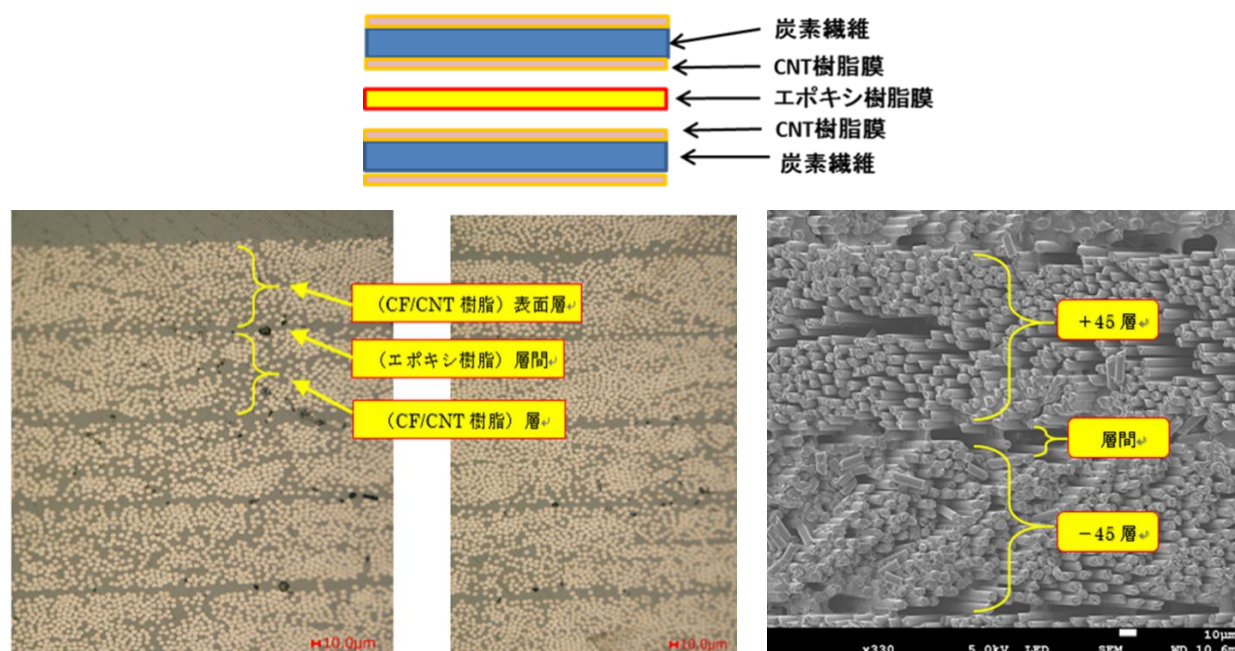
(基準プリプレグの値； G1:100%=0.286J/m²、GII:100%=0.583KJ/m²)

図 1-9 各材料の破壊靱性 (モード I, モード II) の破壊靱性値比較 (平成 28 年度結果)

●各材料の力学特性評価： 平成 28 年度のせん断特性の比較結果では、(プリプレグ/CNT 樹脂)の強度がプリプレグより 12%向上する結果となった。一方、(CF/CNT)CFRP および(CF/CNT/樹脂)のせん断強度はプリプレグより低下する結果となった。せん断弾性は CNT 樹脂の付加により増加する結果となった。破壊靱性値はモード I (面外靱性) では傾斜機能型 CFRP は低下するが、モード II (面内靱性) は 30%から 50%向上している。

●考察： (CF/CNT)CFRP および(CF/CNT/樹脂)CFRP は、ともに自作の(CF/CNT)プリプレグを用いるが、その製作方法は CNT 樹脂膜に CF の繊維束を手で繰り出しながら CF/CNT プリプレグを製作するものである。従って、繊維束間の隙間や重なりあるいは積層時の張力のバラツキなど、品質の均一化を妨げる要素が多い。また、既成プリプレグは CF の表面に適用するサイジング剤が最適化されているのに対し、既成プリプレグを用いない傾斜機能剤の品質は劣ると考えられる。これらが、既成プリプレグを用いない傾斜機能型 CFRP の、せん断強度低下の要因と考えられる。

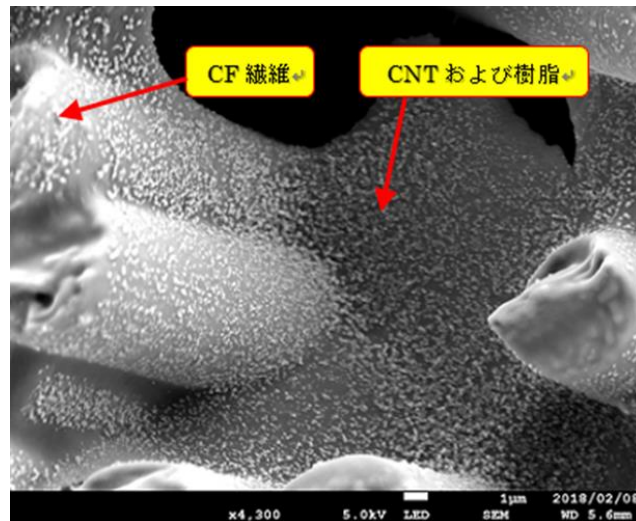
② 平成 29 年度は引き続き (CF/CNT+樹脂)CFRP の製作と改良を行った。28 年度の傾斜機能型 CFRP の破断面の SEM 観察から、CNT 樹脂槽と樹脂層が混じり合い CNT が樹脂層全般に拡散しており、傾斜機能が不十分と考えられた。そこで、傾斜機能型 CFRP の樹脂層をより明確に傾斜化する事を目指し成形方法を変える事とした。すなわち、(CF/CNT 樹脂)の段階で中間硬させて (B-stage と称す)、その後に樹脂層を挟んで積層する工程とした。これにより CNT 樹脂層と樹脂単体層との混じり合いを防ぎ、樹脂特性を階段状にする事を図った。成形後の樹脂層内での CNT 分布状況を確認するために、傾斜機能型 CFRP の樹脂を硫酸で一部溶かして SEM で観察した。結果を図 1-10 に示す。



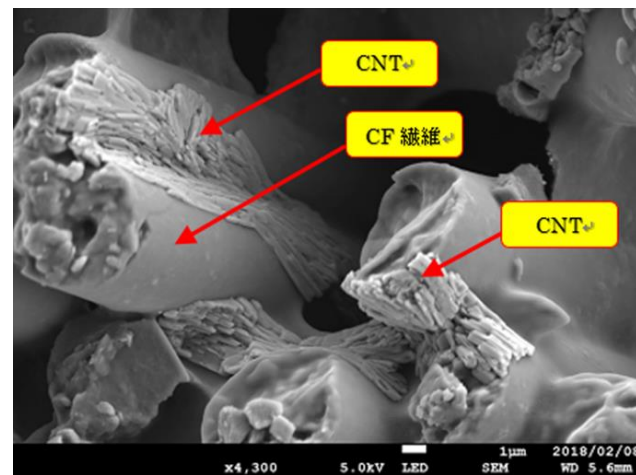
断面（マイクロスコープ）

断面（SEM） 硫酸で樹脂を除去

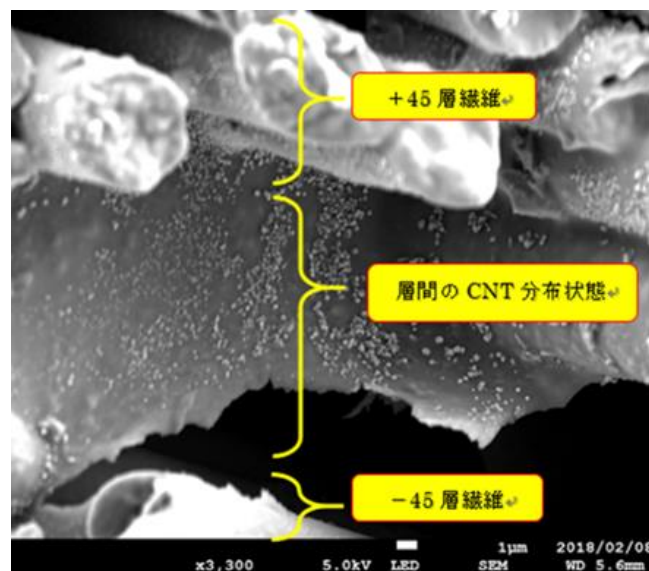
図 1-10 (1) 層間のマイクロスコープ像と断面の SEM 画像



層内における繊維と CNT の分布状態



繊維および凝集した CNT の状態



層間の CNT 分布状態

図 1-10 (2) 層間のマイクロスコップ像と断面の SEM 画像

別途、破壊試験後の破面を SEM 観察した画像を図 1-11 に示す。これは図 1-10 と異なり硫酸で樹脂の一部を溶かした物ではなく成形された状態のままであり、繊維の近傍で CNT がどのような状態となっているかを判断する事ができる。

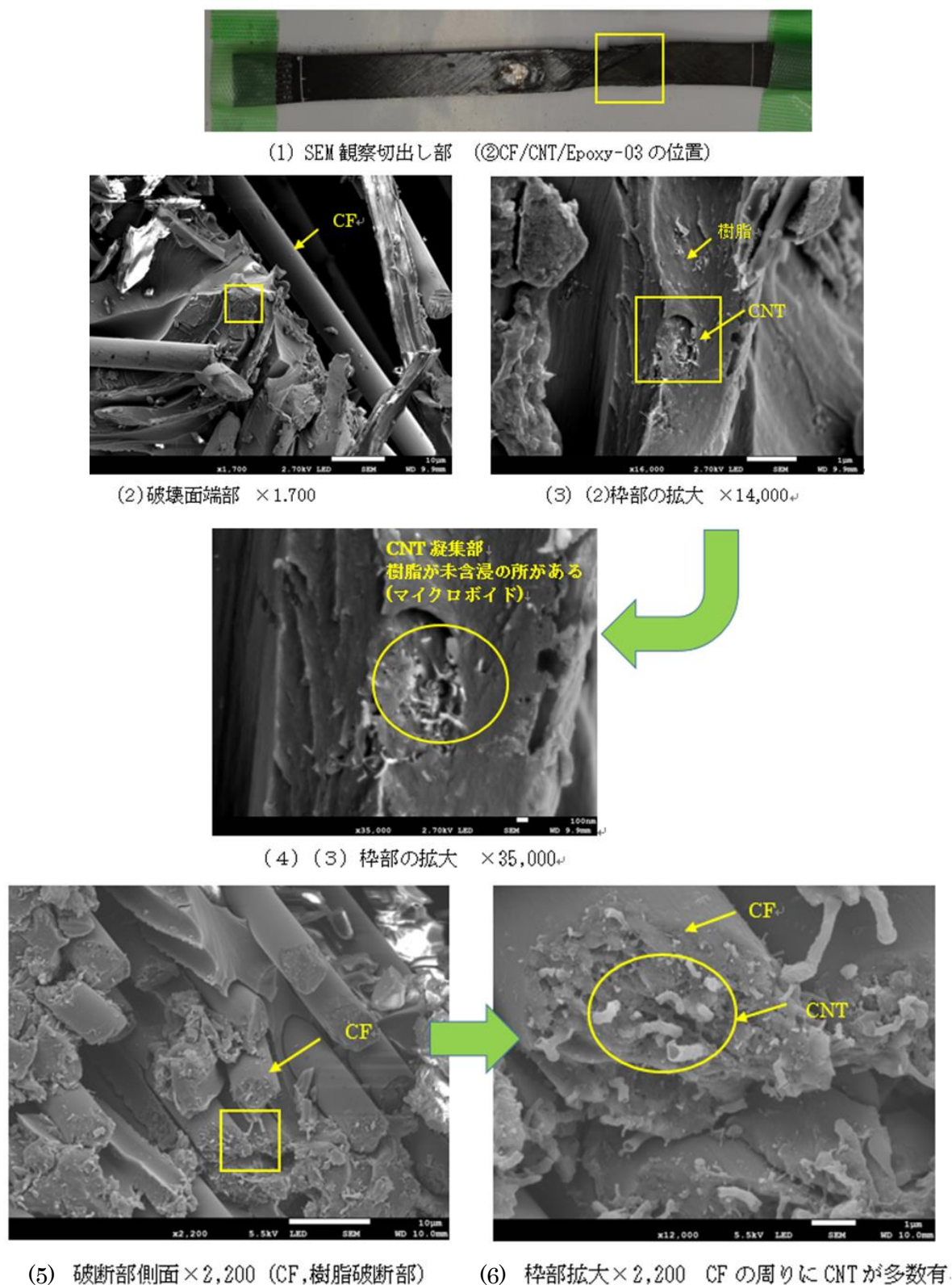
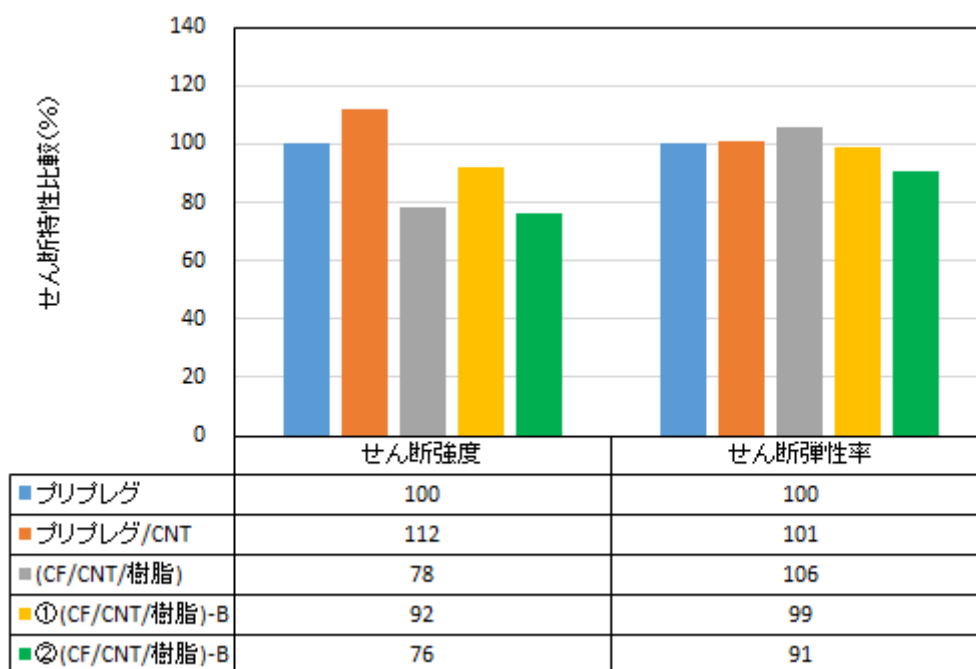


図 1-11 傾斜機能型 CFRP (B-stage) 引張試験後の破断面 SEM 観察結果 (CF 近傍)

●CNT 分布の評価（傾斜機能化）： 硫酸によって表面近傍の樹脂が熔融除去され、繊維の周りと層間の樹脂に含まれる CNT 樹脂を観測することができた。繊維およびその周りには CNT がほぼ均一に密度高く分散し、凝集も起きていない事が画像から判る、一方で、繊維に CNT が付着しているものの、細長い外観を示しながら凝集している部位も存在する。±45 層の層間の樹脂にも CNT が含まれているが、層間の樹脂部に含まれる CNT は繊維周り比べ若干少なめであり、概念に示した傾斜構成になっている事が認められる。また、破壊試験後の破面の SEM 観察結果から下記が判る。

- ・破断は、繊維表面と樹脂との間でおきる界面破壊と、樹脂内破壊の両方の形態が存在する。
- ・繊維が剥がれ、残された樹脂内に CNT が観測できる。
- ・樹脂内の CNT はどの部位でも観察でき、樹脂内での分散はほぼ均一とみなせる。
- ・CNT が凝集している部位では樹脂が含浸せず、マイクロボイドとなっている部分がある。
- ・繊維表面に樹脂が付着した部分では、繊維の表面にも CNT が存在する。

●(CF/CNT+樹脂)CFRP のせん断力学特性： (CF/CNT+樹脂)傾斜機能型 CFRP、市販プリプレグ CFRP および、プリプレグに CNT 樹脂フィルムを重ねて傾斜機能型 CFRP とした各材料のせん断力学特性を比較した結果を図 1－12 に示す。傾斜機能型 CFRP は同時成形法と B-stage 成形法の両方を成形したが、これらの結果も示す。なお、せん断特性の V_f 補正值による比較である。なお、この結果は平成 28 年度と平成 29 年度の結果を併せて示している。



(基準値は図 1－7 に同じ)

図 1－12 V_f 補正を行った面内せん断特性の比較（プリプレグ基準 $V_f=55.4\%$ ）

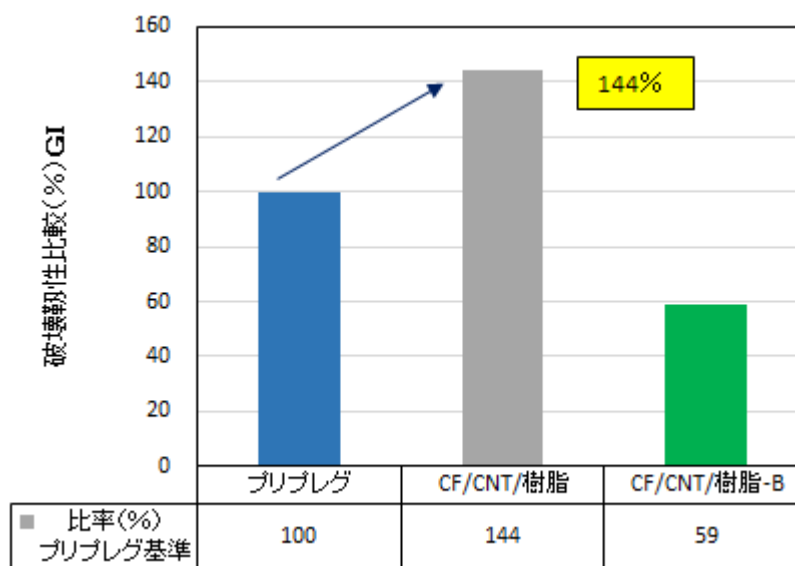
●せん断力学特性の比較結果； 市販プリプレグ CFRP 基準での各種傾斜機能型 CFRP のせん断特性を比較し以下の結果を得た。

- ・ (プリプレグ/CNT)CFRP は、せん断強度が 12%向上し、弾性率は同等である。
- ・ (CF/CNT/樹脂)CFRP は、せん断強度は 22%低下し、弾性率は 6%向上する。
- ・ (CF/CNT/樹脂)-B CFRP は、せん断強度が 8~24%低下し、弾性率は 1~9%低下する。
- ・ CNT 樹脂の適用は、せん断強度特性へ影響を与えるが、せん断弾性率へ与える影響は少ない。

●せん断力学特性の考察； (CF/CNT/樹脂)傾斜機能型 CFRP の製造法は、繊維束を CNT 樹脂膜の上に手で送りながら形成しているため、繊維束の張力や隣接する繊維束との間隔などは十分に均一とは言えない。従って、品質安定性はプリプレグより低いと考えられ、力学特性のバラツキはこの品質のバラツキによると考えられる。プリプレグに CNT 樹脂膜を重ねた CFRP の特性はプリプレグより優れた特性を示しており、品質の安定性が、この特性を示したと考えられる。従って CNT を樹脂に含有する事で、面内せん断特性が向上する事は確認できたと考えられる。

以上から、(CF/CNT/樹脂)傾斜機能型 CFRP も製造品質を向上させる事で、(プリプレグ/CNT) CFRP と同等、あるいはそれ以上の特性向上が期待できると考えられる。

●(CF/CNT/樹脂)CFRP の破壊靱性(モード I)： (CF/CNT/樹脂)CFRP、(CF/CNT/樹脂)-BCFRP および市販プリプレグ CFRP 各材料の層間破壊靱性値(モード I)を比較した結果を図 1-13 に示す。



(基準値は図 1-9 に同じ)

図 1-13 プリプレグと傾斜機能型 CFRP の破壊靱性値比較 (モード I：面外靱性)

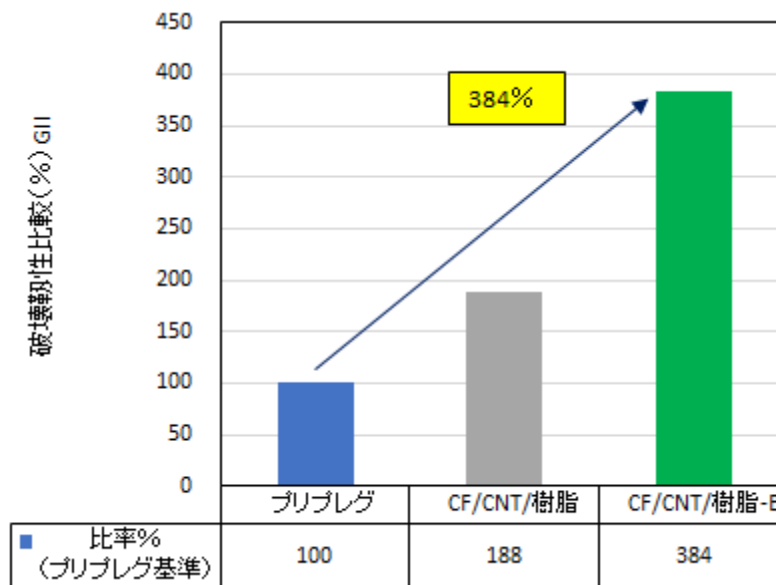
●破壊靱性（モード I）特性の比較評価； プリプレグ CFRP と (CF/CNT/樹脂)傾斜機能型 CFRP の破壊靱性値（モード I）を比較し以下の結果を得た。

- ・ (CF/CNT/樹脂)傾斜機能型 CFRP は、破壊靱性値が 44%程度向上し、1.5 倍程度になる。
- ・ (CF/CNT/樹脂)-B 傾斜機能型 CFRP は、破壊靱性値が 40%程度低下し、約 0.6 倍になる。
- ・ CNT の樹脂への含有は、破壊靱性値（モード I；面外靱性）へ大きな影響を与える。

●考察；

- ・ CFRP の品質が破壊靱性（モード I）へ与える影響は、モード II よりも敏感なようであり、面外方向の荷重に対する CNT 補強効果の主因子の解明には、今後の研究が必要である。
- ・ 品質安定により更なる特性向上が期待できると考えられる。
- ・ (CF/CNT/樹脂)-B 傾斜機能型 CFRP の荷重～亀裂進展カーブは他の 2 種類と異なる挙動を示している。また、GIr が亀裂の進展と共に上昇する度合いが高く、GIc と GIr との比率が最も高い。プリプレグの GIr/GIc（a=70mm）の比が 2 倍程度に対し、傾斜機能型 CFRP は 3 倍となっている。
- ・ このメカニズムの解明ができれば、より安定した GIc（モード I）の向上が図れると考えるが、今後の課題である。

●(CF／CNT+樹脂)CFRP の破壊靱性(モード II)：(CF/CNT/樹脂)CFRP、(CF/CNT/樹脂)-B CFRP および市販プリプレグ CFRP 各材料の層間破壊靱性値(モード II)を比較した結果を図 1－1 4 に示す。



(基準値は図 1-9 に同じ)

図 1－1 4 プリプレグと傾斜機能型 CFRP の破壊靱性値比較（モード II：面内靱性）

●破壊靱性（モード II）特性の比較評価と考察； プリプレグ CFRP と (CF/CNT/樹脂) 傾斜機能型 CFRP の破壊靱性値（モード II）を比較し以下の結果を得た。

- ・ (CF/CNT/樹脂) 傾斜機能型 CFRP は、破壊靱性値が 90% 程度向上し、約 1.9 倍になる。
- ・ (CF/CNT/樹脂)-B 傾斜機能型 CFRP は、破壊靱性値が 280% 程度向上し、約 3.8 倍になる。
- ・ CNT の樹脂への含有は、破壊靱性値（モード II；面内せん断靱性）へ大きな影響を与え、向上効果は極めて大きい。特に B-stage 化して樹脂の特性を明確に傾斜機能化する効果は大である。
- ・ せん断強度の特性で述べたとおり、品質の不均一があってもこの特性が得られており、品質安定による更なる向上が期待できる。

●「CF/CNT 樹脂+樹脂」による傾斜機能型 CFRP の開発・評価のまとめ：

傾斜機能型 CFRP を開発し既存の CFRP と比較して以下の結果を得た。また研究目標に対する達成度は以下の通りである。

（せん断強度・弾性率）

- ・ (プリプレグ/CNT) 傾斜機能型 CFRP は、せん断強度が約 1.2 倍となる。
- ・ (CF/CNT/樹脂) 傾斜機能型 CFRP は、せん断強度が約 0.9 倍となる。
- ・ CNT 樹脂層の適用は、せん断弾性率へ与える影響は少ない。

（破壊靱性）

- ・ (CF/CNT/樹脂) 傾斜機能型 CFRP は、
破壊靱性(モード I)は 約 1.5 倍となる。
破壊靱性(モード II)は 約 3.8 倍となる。

➤ 目標の達成度； 傾斜機能型 CFRP の力学断特性を現状の 2 倍を目標とし、

- 1) 傾斜機能材に必須となる均一に CNT が分布した CNT 樹脂膜の製作に成功し目標を達成。
- 2) せん断力学特性は最大で現状の 1.2 倍の成果で未達。
- 3) 破壊靱性(モード I)は最大で現状の約 1.5 倍で未達。
- 4) 破壊靱性(モード II)は現状の 2 倍との目標を超える、約 4 倍となり目標を達成。

➤ 今後の課題； 傾斜機能型 CFRP の品質向上が課題である。一方で、品質改善による性能向上が可能である見通しを得ている。

d. 「CNT 樹脂」による二次接着プロセスの開発・改善

平成 29 年度から開発した傾斜機能接着剤を用いて二次接着された構造継手要素について、接着強度、破壊靱性値を取得・評価する。接着される CFRP にはプリプレグ CFRP と傾斜機能型 CFRP の両方を適用し、目標である傾斜機能型接着材による「CFRP 間の二次接着面靱性：2 倍程度の向上」の達成状況を評価する。以下、これらの結果を示す。

この傾斜機能型接着剤を用いて二次接着する構造継手要素の構成概念を図 1-15 に示す。接着剤表面に CNT 樹脂膜を挟むことで接着剤の剛性を段階的に変化させ、層間の応力集中度合を低下させる事で、接着部の耐荷能力の向上を図るものである。傾斜機能型 CFRP の層間特性を向上させる概念と同じであり、同様に接着剤へも適用する構想である。なお、CNT 含有の効果をより判り易くするため、接着剤は強度の低い物を採用し、CFRP 母材破壊などへの影響を少なくするよう計画した。接着強度試験用供試体および、破壊靱性試験用供試体の形状を図 1-16 および図 1-17 にそれぞれ示す。なお、接着材はせん断方向荷重に対応するものであり、従って破壊靱性はモード II（面内靱性）のみを評価した。

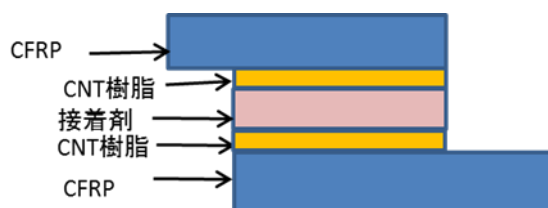


図 1-15 傾斜機能型接着剤によって二次接着された構造継手要素の構成概念

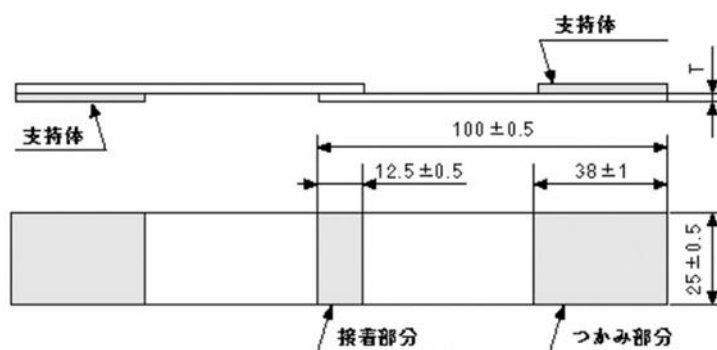


図 1-16 接着強度試験 CFRP 供試体の代表寸法・形状（JIS K 6850 による）

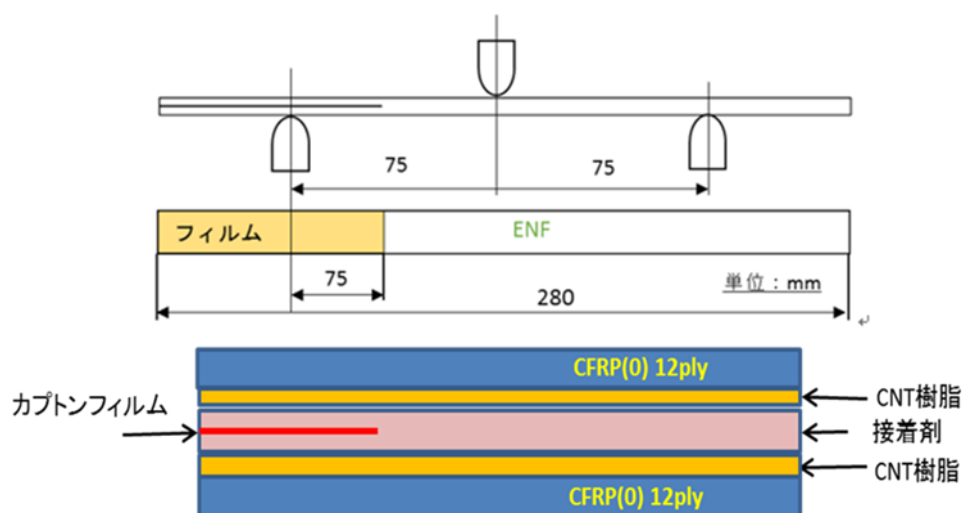


図 1－17 接着部破壊靱性試験 CFRP 供試体の代表寸法・形状

被接着材料である CFRP と接着剤との組み合わせを表 1－1 に示す。CFRP が 2 種、接着剤が 2 種であり、プリプレグ CFRP と傾斜機能化させていない既成の接着材の組合せを性能比較の基準とした。適用した接着材を表 1－2 に示す。

表 1－1 被接着材料である CFRP と接着剤／CNT 樹脂膜との組み合わせ

番号	被接着材	接着材	CNT 樹脂膜	備考
①	CF/CNT/Epoxy-CFRP	フィルム	○	傾斜機能 CFRP＋傾斜機能接着材
②		液体	○	
③	Prepreg-CFRP	フィルム	○	プリプレグ CFRP＋傾斜機能接着材
④	Prepreg-CFRP	フィルム	×	比較の基準
⑤		液体	×	

表 1－2 適用した接着材(フィルム接着材、液状接着材)

項目	液状接着材	フィルム接着材
商品名	イーザーミックス ロックタイト LOCTITE LEM-006	サンユレック エポキシフィルム樹脂 DRS-022
商品種類	接着剤 2 液タイプ	樹脂シート
色	透明	透明
硬化時間	15 分(23℃)	2 時間(130℃)
可使時間	約 3 分	保管 10℃以下
主成分	(主剤) エポキシ樹脂 (硬化剤) ポリメルカプタン・変性アミン	(主剤＋硬化剤) エポキシ樹脂＋変性アミン

● CNT 含有接着材による二次接着能力の力学特性比較評価

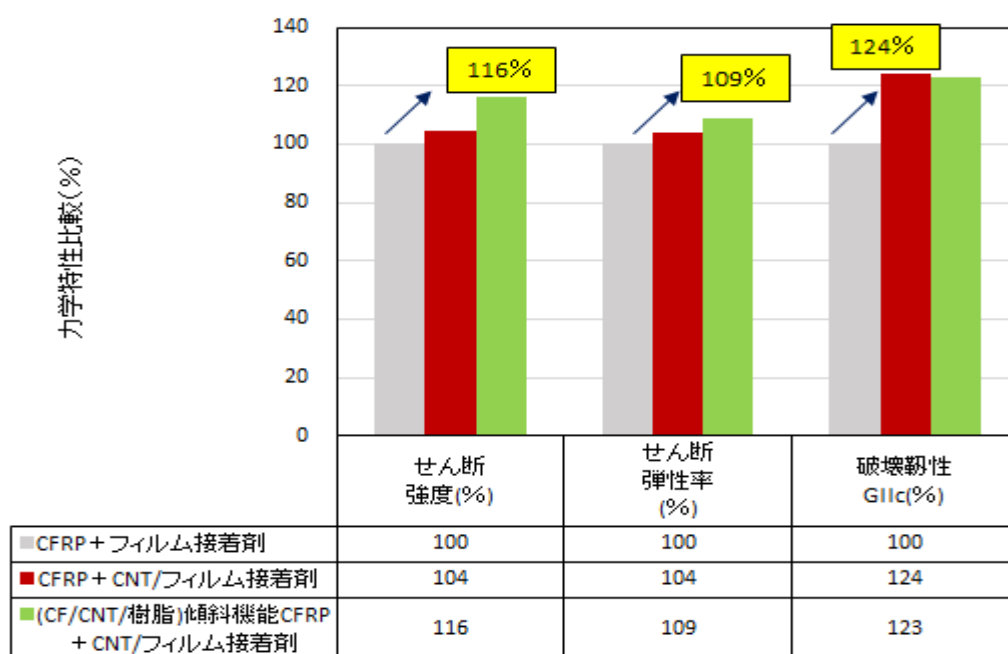
傾斜機能型 CFRP およびプリプレグ CFRP を、傾斜機能型接着剤および既成接着剤とで二次接着を行った各供試体の力学特性比較評価項目を表 1－3 に示す。

表 1－3 各種 CFRP 成形品と各種接着剤との比較評価項目

番号	項目	取得データ	試験項目	積層構成	繊維	CNT 樹脂
c-4	CNT 樹脂含有接着剤による二次接着能力の評価	弾性率・強度 破壊靱性	±45° 引張試験 ENF	・ [±45]6s 24ply ・ [0] 24ply	三菱レイヨン TR50S12L	MWCNT

① フィルム接着剤適用場合の力学特性比較

傾斜機能フィルム接着剤と通常のフィルム接着剤を適用した場合の特性比較を図 1－18 に示す。



(基準値；強度100%=15.86MPa、弾性率100%=4.23GPa、靱性値/GII:100%=0.07KJ/m²)

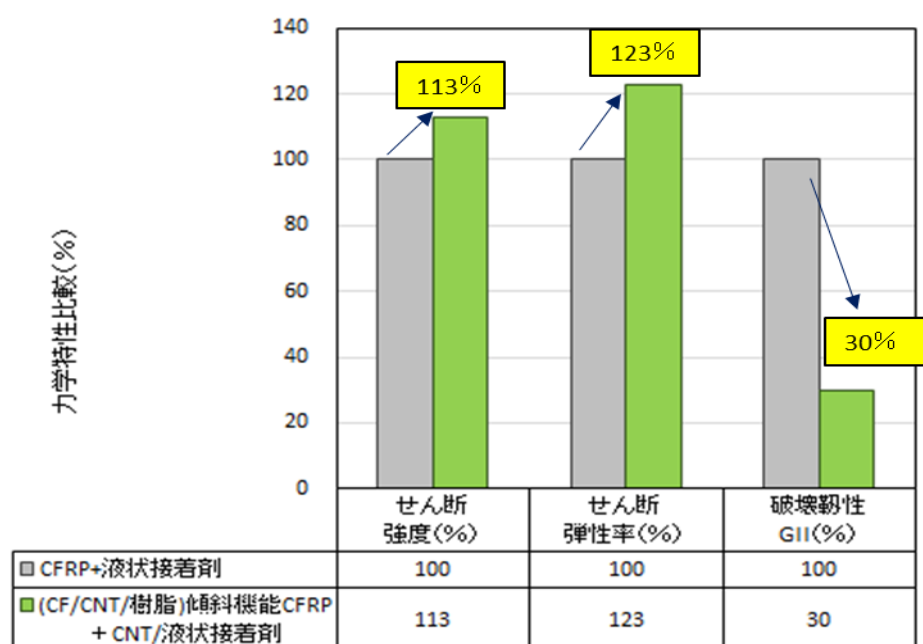
図 1－18 力学特性の比較 (プリプレグ CFRP + フィルム接着剤基準)

●特性の比較評価； フィルム接着剤の場合

- ・プリプレグ CFRP + CNT/フィルム接着剤 (傾斜機能フィルム接着剤) は、せん断強度：4%、弾性率：4%、破壊靱性 (GIIc)：24% 上昇する。
- ・(CF/CNT/樹脂)傾斜機能型 CFRP + CNT/フィルム接着剤は、せん断強度：16%、弾性率：9%、破壊靱性 (GIIc)：23% 上昇する。
- ・傾斜機能型 CFRP と傾斜機能フィルム接着剤の組合せが、力学特性を向上させる。CNT をフィルム接着剤に適用する事は、せん断強度を向上させる効果が高い。さらに破壊靱性 (モード II) に与える効果はさらに大きい。

② 液状接着剤適用場合の力学特性比較

傾斜機能液状接着剤と通常の液状接着剤を適用した場合の特性比較を図 1-19 に示す。



(基準値；強度 100%=2.73MPa、弾性率 100%=4.22GPa、靱性値/GII:100%=0.336KJ/m²)

図 1-19 力学特性の比較（プリプレグ CFRP+液状接着剤基準）

●特性の比較評価；液状接着剤の場合

- ・(CF/CNT/樹脂)傾斜機能型 CFRP+CNT/液状接着剤（傾斜機能型液状接着剤）は、せん断強度：13%、弾性率：23%上昇するが、破壊靱性（GIIc）：30%と低下する。
- ・CNT を液状接着剤に適用する事は、せん断強度と弾性率を向上させる効果が高い。一方で破壊靱性（モード II）が大きく低下する結果となった。

●考察；

- ・CFRP の二次接着面品質が力学特性に与える影響は大きい。本研究での傾斜機能型破壊靱性用供試体（モード II）の接着面および処理方法が、所期の品質を保っていない可能性がある。
- ・他の特性がいずれも CNT の含有で向上している結果から推察すると、当該供試体の品質を安定化する事により、破壊靱性も向上する事が期待できる。

●傾斜機能型接着剤による二次接着のまとめ：

傾斜機能型接着剤を開発し既存の接着材と比較して以下の結果を得た。また研究目標に対する達成度は以下の通りである。

（せん断強度・弾性率）

- ・傾斜機能型接着剤により、せん断強度が 約 1.2 倍となる。
- ・傾斜機能型接着剤により、せん断弾性率が約 1.2 倍となる

- ・CNT 樹脂層の適用は、せん断弾性率へ与える影響は少ない。

(破壊靱性)

- ・傾斜機能フィルム接着剤では、破壊靱性(モード II)は 約 1.2 倍に向上する。
- ・傾斜機能液状接着剤では、破壊靱性(モード II)は 約 0.3 倍に低下する。

➤ **目標の達成度；** 傾斜機能型接着剤の層間破壊靱性を現状の 2 倍を目標とし、

- 1) 傾斜機能フィルム接着剤は、破壊靱性(モード II)は 現状の 1.2 倍の成果で未達。
- 2) 傾斜機能液状接着剤は、破壊靱性(モード II)は 現状の 0.3 倍の成果で未達

➤ **今後の課題：** 傾斜機能型接着剤の接着面の品質向上が課題である。接着面の表面処理の改善、による性能向上が可能である見通しは得ている。

e. 界面強度向上のメカニズム把握

平成 27 年度に取得した力学特性及び平成 28 年度に取得した層間破壊靱性値を、結合力モデル (Cohesive Zone Model) を用いた損傷進展シミュレーションに適用し、CNT 添加による層間強度向上のメカニズムを考察した。

層間へ添加された CNT が層間強度へ与える影響を明らかにするための解析手法について検討した。ここでは、汎用性を考慮して商用有限要素解析ソフトウェアの ABAQUS 2016 (ダッソー・システムズ社製) を用いて、DCB 試験によるモード I 層間剥離伝播現象のシミュレーションを試みた。

図 1-20 のように CFRP 部は一方向材の材料物性を持つ 8 節点連続体シェル要素 (Continuum shell element, SC8R) で定義し、層間に組み込む 8 節点結合力要素 (Cohesive element, COH3D8) を層間剥離が進展する中央界面に挿入した。図 1-21 に示す通り荷重及び境界条件と形状及び物性値の対称性を考慮して幅方向に対して半分の領域 (10mm 幅) のみをモデル化した。試験では負荷部にピアノヒンジを接着し上下方向に引っ張ることで試験を行っている。これを解析で再現する為、ヒンジに相当する位置で荷重方向以外の並進自由度を拘束し、静的な変位を付与することで再現した。変位負荷は上方に 30mm 与えることとし、境界条件は前述した通り、下部のピアノヒンジ相当部の全方向の並進自由度を拘束した。メッシュの面内寸法は 0.5mm x 0.5mm とし、CFRP 部は板厚 (片側 1.7mm) 方向に 3 分割、層間樹脂は厚さを 0.05mm として 1 分割した。モデルの全要素数は 53,800 (SC8R:48,000、COH3D8: 5,800)、全節点数は 67,368 である。

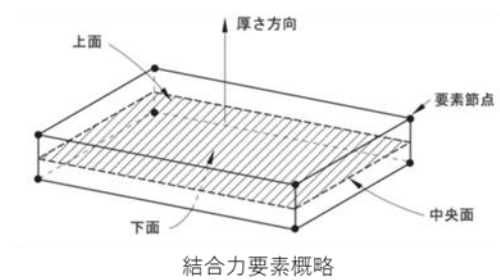
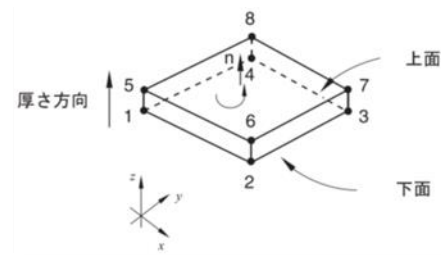
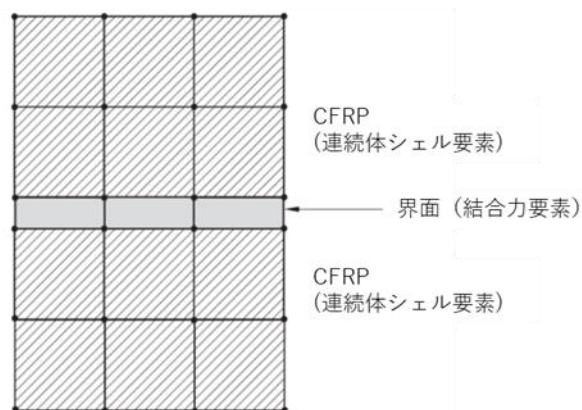


図 1-20 損傷進展挙動検討モデル概要

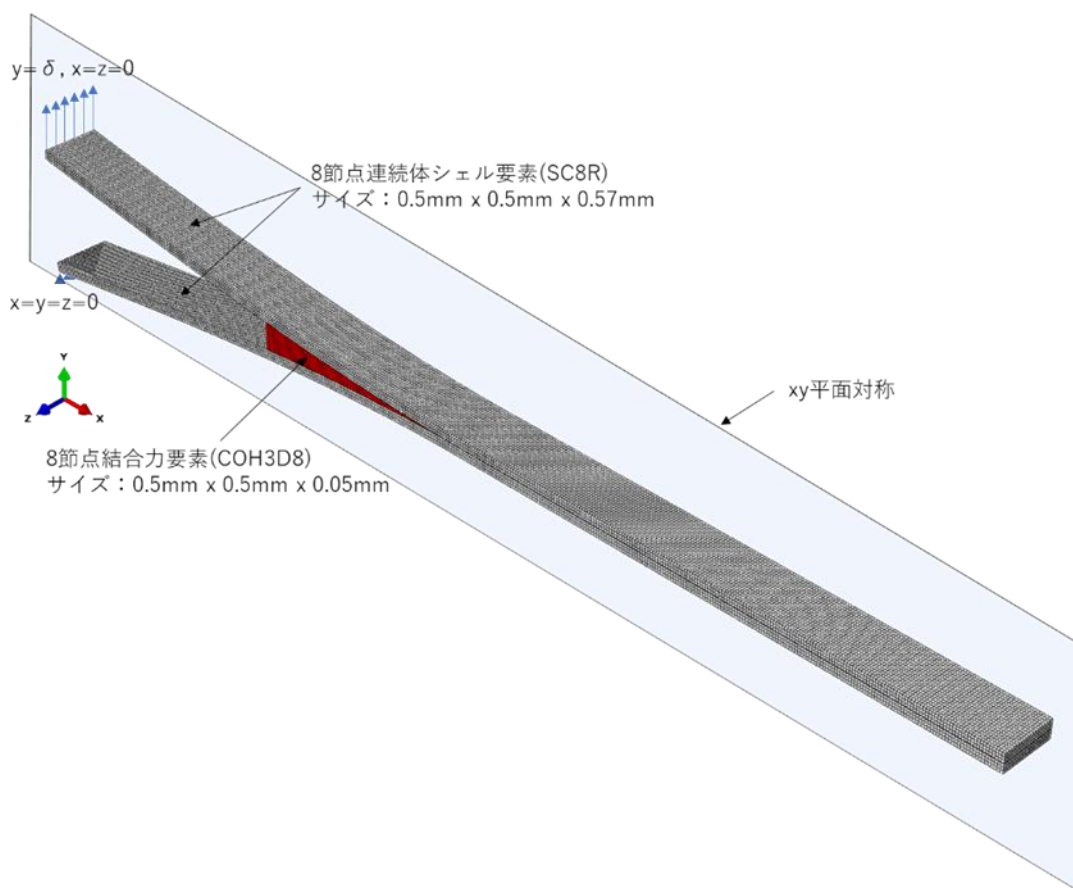


図 1-21 DCB 試験モデル概要

➤ CNT 添加樹脂層のランダム分布モデル

SEM 観察画像から CNT を添加した樹脂層内での CNT の分散状態を推察すると、均一というよりはランダムに分散している状態であると考えられる。したがって、本研究では CNT を添加した樹脂層のモデル化には、エクセルの乱数関数を用いて CNT の分散状態を結合力要素の要素番号として扱うことで、樹脂層にランダムに CNT 添加部が存在するようにした。CNT 添加樹脂層を成形する際の要求値を前提に、以下をモデル化の際の制約条件とした。

制約条件：

- CNT（日東紡社製のマルチウォールカーボンナノチューブ）の密度は $2.0\text{g}/\text{cm}^3$ 、樹脂層を形成するエポキシ樹脂の密度は $1.1\text{g}/\text{cm}^3$ と仮定する。
- CNT は平面的に分散していると仮定し、樹脂層の厚さ方向の分散は無視する。
- エポキシ樹脂層中に含まれる CNT の量は 1.15wt% である。
-

上記条件により、樹脂層中のエポキシと CNT のそれぞれの面積率を計算すると、約 98% と 2% となる。この面積比と同じになる様に層間に組み込む結合力要素数を調整し、非強化部のエポキシと CNT 強化部を表す特性を有する要素に分ける。層間での CNT 添加部の配置はエクセルの標準関数機能である乱数を用いてランダム配置となる様にモデル化を行う。層間樹脂層のメッシュの代表例 (樹脂層のみ表示) を図 1-22 に示す。

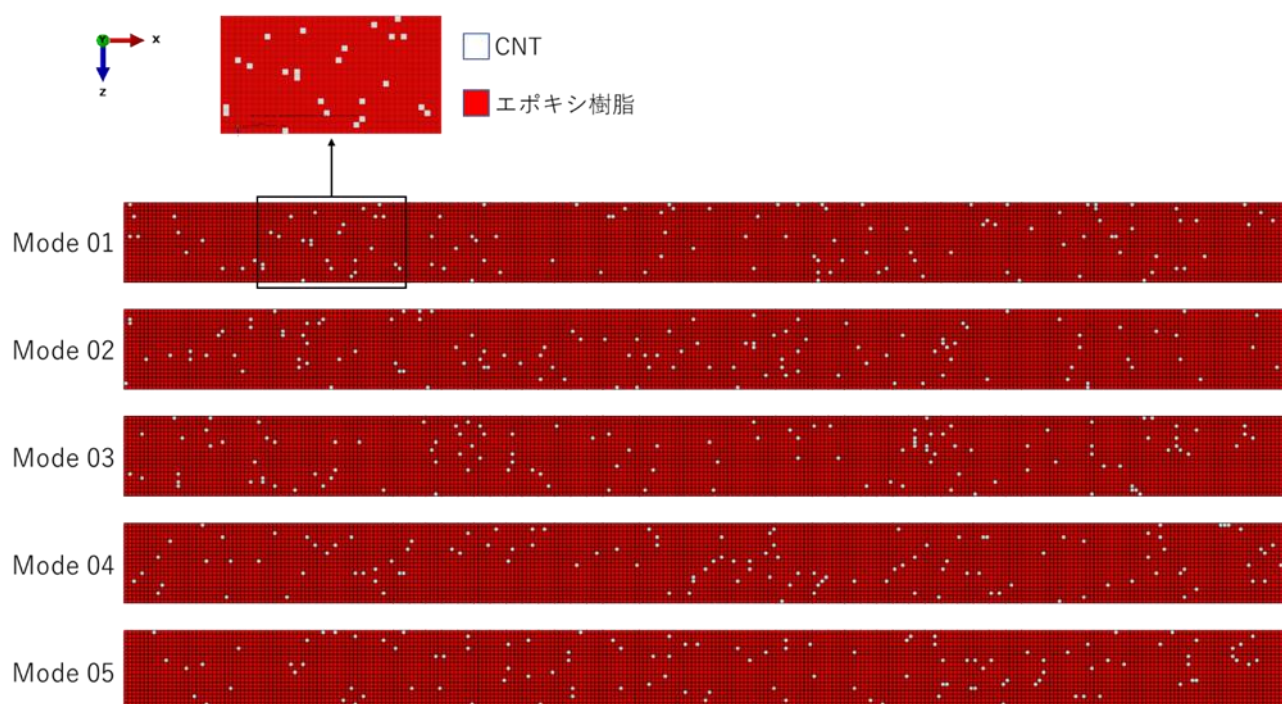


図 1-22 CNT がランダム分布した層間樹脂層（代表 5 ケース）

➤ 解析結果

解析モデルを下記の4モデルとしてDCB試験解析を行い、荷重と開口変位とのシミュレーション結果と実験データとを比較し、最も影響のある因子を求めた。層間剥離進展開始時のトラクション（結合力）数倍に変化させて影響の度合いを調べた。

- 均質モデル
- 局所的な剛性向上の影響確認モデル
- 局所的な強度向上の影響確認モデル
- 局所的な靱性向上の影響確認モデル

「局所的な靱性向上の影響」ケースの解析結果は、他の物性値と比べると局所的な靱性値の影響は大きいといえる。荷重と開口変位の関係を図1-23に示す。試験値との乖離は未だ残るものの、剥離進展開始時の荷重の不安定挙動もある程度説明できる傾向を示していると考えられる。さらに、局所的な靱性値をそれぞれ10倍と20倍に増大させた解析結果を図1-24に示す。これより、解析結果はかなり試験データに近づくことが分かる。CNTは樹脂層内で互いに凝集して塊のような状態で分散していると考えられる。本モデルはそのような状態を表すには適していると考えられ、CNT凝集体による局所的な靱性値を大体に増大させることにより全体の層間破壊靱性値の向上につながることを説明できる知見が得られたと考えられる。ただし、剥離進展の様相を比較してみると、靱性値の増大値によらずほぼ一定であることが分かった。これは局所的な強度（トラクション）に傾斜を与えていないことに起因すると考えられる。

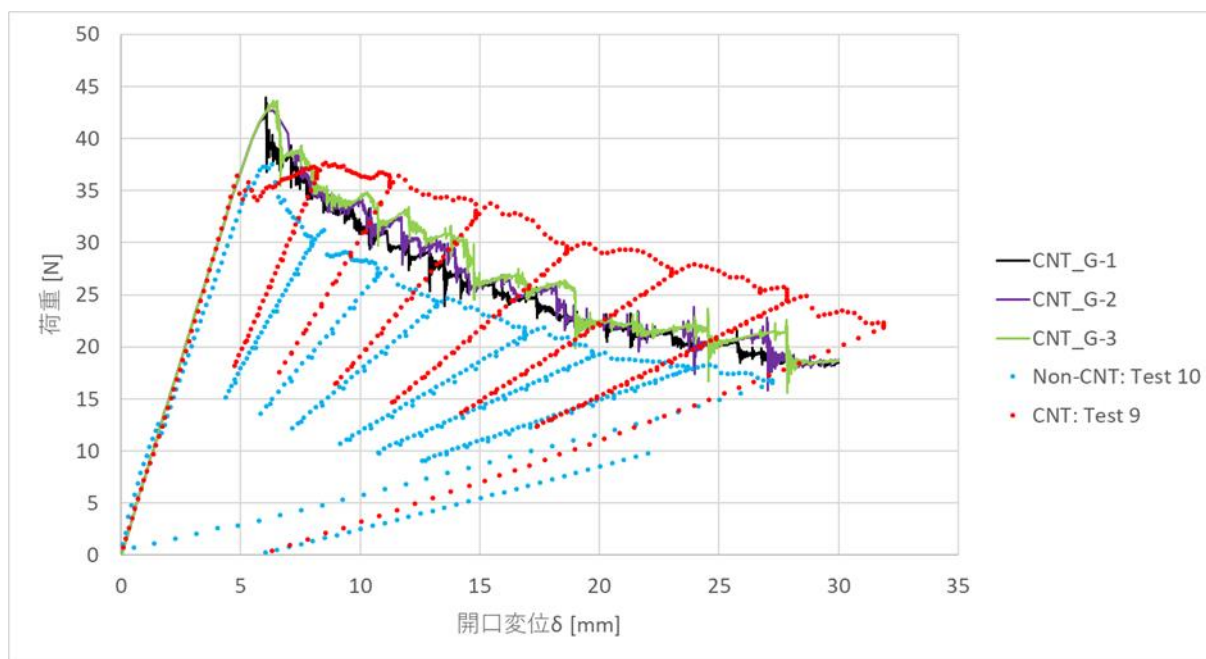


図1-23 DCB試験解析結果（分散モデル：局所靱性の影響）

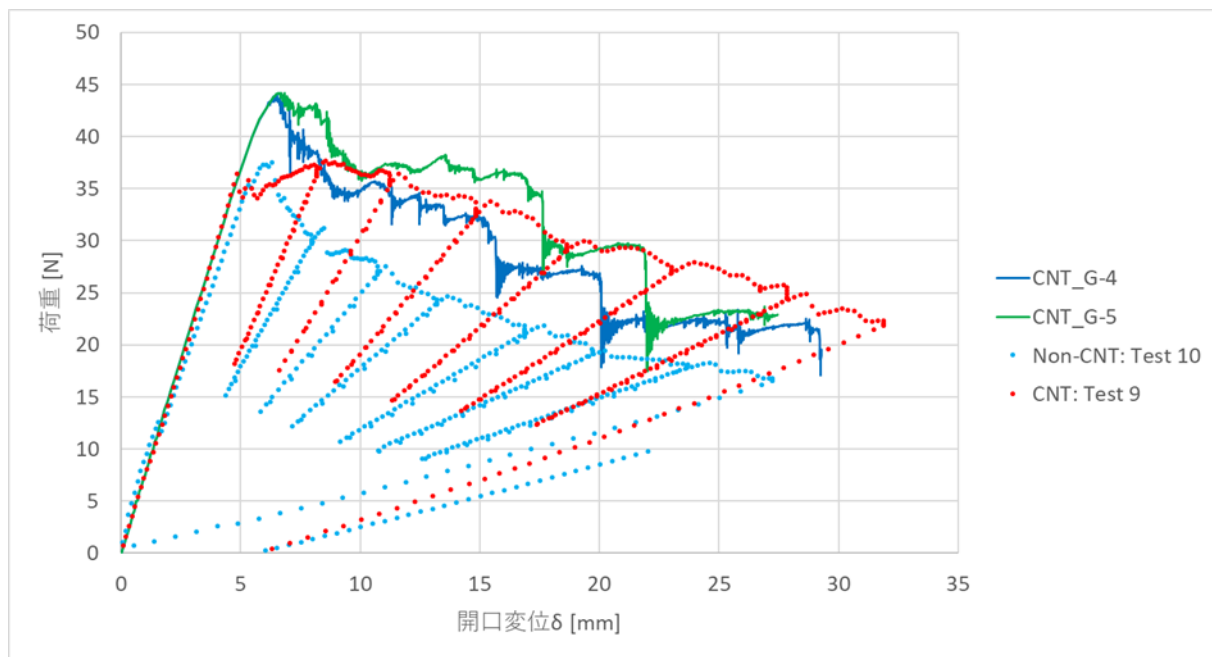


図 1-2-4 DCB 試験解析結果（分散モデル：局所靱性を 10 倍、20 倍にした場合）

● 界面強度向上メカニズム把握のまとめ

解析結果の考察より、CNT 分散を網羅した結合モデルを考えた場合、CNT が互いに凝集して塊のような状態で混合重量に比例してランダムに分散していることを前提とすると、局所的な靱性値の影響は非常に大きな意味を持つことが示された。今回の結合力要素を用いた確率論的な有限要素モデルは、CNT 凝集体の層間剥離抑制効果を説明できる一つのアイデアであるといえる。たとえ少量の CNT が分散された樹脂層であっても、CNT 凝集体の架橋挙動の累積によりマクロな層間破壊靱性値が大きく向上した試験結果を裏付けることが可能であると考えられる。ただし、局所的な抑制効果が層間剥離進展形状に与える影響を考察するためには、同時に CNT 凝集体の架橋効果による層間強度増加影響もモデルで考慮する必要がある、さらにはモード II 破壊靱性試験へ適用し、試験結果との整合性を確認しながら適切に評価していく必要がある。

➤ **目標の達成度；** 界面強度向上のメカニズム把握を目標とし、

- 1) 界面特性を模擬できる各種解析モデルを確認し、メカニズム解明の**手法構築の目標を達成**
- 2) CNT が分散する事が、界面靱性の向上に最も**有効な因子である事を解明**

➤ **今後の課題：** 層間強度の影響など他の因子についての考慮と、モード II への適用による評価・修整などが必要である。

1. 2 研究課題終了後の将来性

① 層間強度と層間破壊靱性の向上； 本研究は、CFRP 積層板を構造へ適用する場合の最も大きな課題の一つである、層間強度と層間破壊靱性の向上を目指したものである。CFRP の高性能は広く知られつつある一方で、実際の適用においては衝撃を受けた場合の圧縮強度の大幅な低下や層間破壊靱性の低さから、CFRP の特性を十分に生かせていない。図 1－2 5 に航空機に使われている複合材の衝撃後圧縮強度と他の特性を示す。設計時にはこれらの特性低下に対応するために部材応力を下げる、すなわち部材の板厚を増やす事となり、これはそのまま重量増加へと繋がるため構造物へ CFRP を適用する最大の目的が十分に果たせていない。これらの課題を解決する最も有効な手段が、層間強度の向上と層間破壊靱性の向上である。

本研究では、CNT 樹脂と樹脂を段階的に重ねることで樹脂の傾斜機能化を果たし、層間破壊靱性値が目標を大幅に超える成果を得た。これによって、課題の一つを克服できる目途を定量的に示す事ができた。一方の層間強度も、繊維を適切な設備を用いて高品質な[(CF/CNT 樹脂) + 樹脂]のプリプレグを製造する事で、本研究成果以上の性能が得られる目処を得ている。これらの課題は CFRP プリプレグ製造メーカーの設備と品質管理体制のもとで製造する事で、確実に実現できると考えられる。以上から、本技術は産業界へトランスファーできる段階に達していると考えている。それが可能となった時点で、将来の産業界など民生分野への貢献度は極めて大きい。

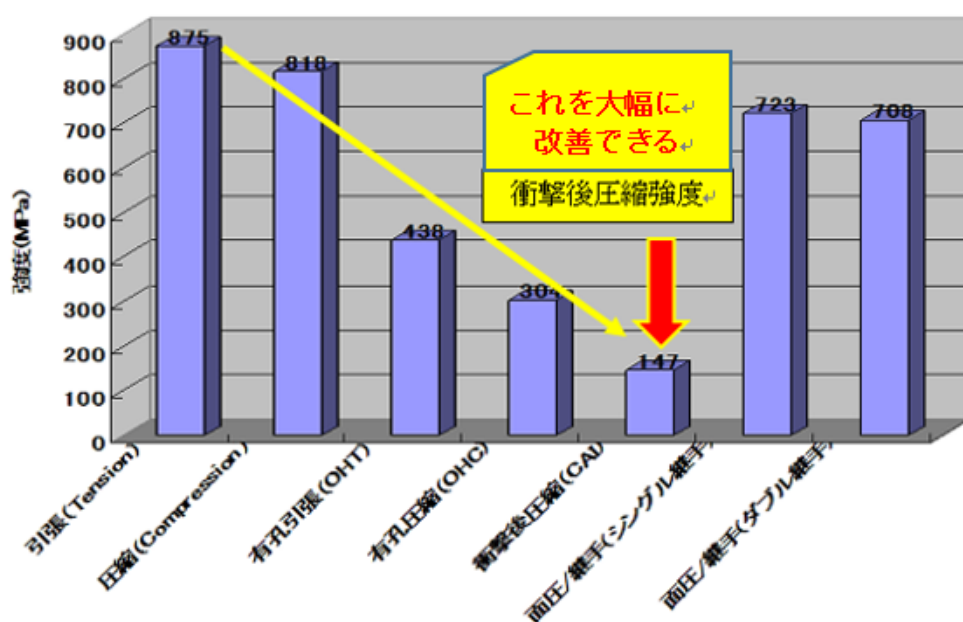


図 1－2 5 各種強度比較 (T800H/3633 の例)

② 傾斜機能型接着剤； 傾斜機能型接着材による二次接着の技術開発に関して、研究の余地を残している。本研究で性能が向上する成果を得ているが、改善すべき課題が多く残っている。二次接着は実構造での適用例が多くそれに伴い課題も多いが、本研究成果は性能向上の有効な手段であり、今後も研究が継続されるべきと考える。なお本技術の開発による産業界への貢献は極めて大きい。

③ 界面向上メカニズムの解明； 本課題に関しては研究の余地を残している。解析手法の選定と界面向上の主要因子について解析によって明らかにしてきたが、定性的な段階に留まっている。多くの実験データを本研究で得ており、今後はこれらのデータを活用して解析精度の向上と破壊メカニズムをより明確にする事で、その対策としての材料特性向上をより具体的に示すべきであろう。そのためには今後の研究継続が望ましく、将来に涉って学究分野での研究は継続されたいと考える。

1. 3 副次的成果や目標を超える成果

① 副次的成果； 本研究の成否を決める要因の一つは CNT を樹脂内に均一に分散させると共に、CNT 樹脂薄膜を製作する事であった。そこで、外部の成膜業者の協力により CNT 樹脂の薄膜化を試みてもらったが、当初の想定以上の成果を得る事ができている。すなわち、スクリーン印刷によって任意の膜厚でかつ CNT 分布も均一と見なせる薄膜の製作のみならず、成形加熱時の脱泡も可能にできるように薄膜に任意の間隔と直径の孔を開ける事も可能となっている。専門技術を有する企業の協力で、当初は大きな課題であった本項目は比較的容易に解決する事ができた。さらにその技術で CFRP の表面に導電性などの機能性を持たせる事が可能であり、CFRP の適用範囲や機能材料としての可能性を見出せる事ができるという大きな副次的成果を得ている。

② 目標を超える成果； CFRP 積層構造に求められる性能として高い強度は当然であるが、層間破壊靱性値の高さも求められる。積層材であり接着構造でもある CFRP 構造の実運用時には、疲労などによる亀裂の進展を抑える性能が極めて重要である。そのためにはまず層間破壊靱性の向上が必要であり、二次接着においても接着材の靱性値の高さが求められる。強度の観点からは、CFRP 材も接着材も既に高い性能を有する材料が市販されているが、破壊靱性値は改善すべき課題として残っている。CFRP 実機構造では亀裂が進まないような応力とすべく板厚を増やして対応しているが、本来は CFRP を高靱性材料に改善し、金属構造と同様に損傷許容設計を取り入れて、初めて CFRP の性能を十分に発揮し、軽量化によるエネルギー低減や環境のグリーン化に貢献できる材料である。

一方、本研究の成果として、当初の CFRP の層間破壊靱性値改善目標を従来材の 2 倍程度と置いたが研究最終年度の平成 29 年度に、従来材の 4 倍の性能を出す成果を得た。これは目標を更に 2 倍超える成果であり、本研究で明らかになった課題を早急に解決すべく、研究の継続を強く望むものである。

1. 4 論文、特許、学会発表等の成果

平成27年度後半から本研究は開始しており、その成果を基に、平成28年度、平成29年度と前年度の成果を学会で発表している。また、特許出願を1件提出した。実績を下記に示す。

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
Interlaminar reinforcement of CFRP with carbon nanotubes (口頭)	永尾 陽典、十二所 正	第一回 複合材ワークショップ 防衛省市ヶ谷	平成28年2月24日	国内
CNT含有樹脂がCFRPの強度に与える影響について (口頭)	永尾 陽典、十二所 正、中島 翼、 柴田 夢二郎、青木 雄一郎	第58回 構造強度に関する講演会 (日本航空宇宙学会)	平成28年8月3日	国内
CNT含有樹脂によるCFRP力学特性に与える効果 (口頭)	永尾 陽典、羽生田 智哉、十二所 正、 中島 翼、青木 雄一郎	第41回複合材料シンポジウム (日本複合材料学会)	平成28年9月15日	国内
CNT含有の傾斜機能CFRPの力学特性について (口頭)	永尾 陽典、十二所 正、塩谷 桃果、 大谷 雄士、青木 雄一郎	第58回 構造強度に関する講演会 (日本航空宇宙学会)	平成29年8月5日	国内

② 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文(発表題目)	発表者氏名	発表した場所(学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
CNT含有樹脂がCFRPの強度に与える影響について	永尾 陽典、十二所 正、中島 翼、 柴田 夢二郎、青木 雄一郎	第58回 構造強度に関する講演会 講演集	平成28年8月3日	国内
CNT含有樹脂によるCFRP力学特性に与える効果	永尾 陽典、羽生田 智哉、十二所 正、 中島 翼、青木 雄一郎	第41回複合材料シンポジウム 講演集	平成28年9月15日	国内
CNT含有の傾斜機能CFRPの力学特性について	永尾 陽典、十二所 正、塩谷 桃果、 大谷 雄士、青木 雄一郎	第58回 構造強度に関する講演会 講演集	平成29年8月5日	国内

③ 特許出願

実施 年度	発明の名称	発明者(所属)	出願登録 区分	出願番号(出願日)	出願 区分	出願国	登録番号(登録日)	メモ
28	炭素繊維強化プラスチック およびその製造方法	・永尾 陽典 (神奈川県工科大学) ・十二所 正 (株)N.A.C.T	出願	特願2016-150071 (平成28年7月29日)	国内		・整理番号:2016005-K1 ・受付番号:51601597643 (平成28年7月29日)	国際特許分類 C04B 35/80

④ 目標の達成に向けて実施した活動

●計測装置等： CFRP の力学特性計測には、荷重負荷が可能な試験機と計測装置が必要となる。研究代表者が大学で所有する試験機は島津製作所の10ton 万能試験機が一台のみである。一方、宇宙航空研究機構(JAXA)の複合材センターには、数gから1,000tonの荷重を負荷できる多数の環境設備付き複合材試験装置や試験ジグ、および電子顕微鏡など最新の計測装置が多数設置されており、また、多くの研究員と共に CFRP 特有の試験方法を熟知し、経験豊富な試験員の支援を受けられる体制が整っている。そのため、JAXA 複合材センターは日本における CFRP の研究には最も適した施設

の一つと認められている。一方、本研究代表者はこの JAXA の客員研究員でもあり、それらの設備を無償で利用できる待遇を受けている。そのため恵まれた設備・人的環境の中で研究を進める事ができた。

●**人的ネットワーク**； 上記 JAXA の客員として、複合材センターの研究員と意見交換やデータチェック、およびそれに基づく議論などを適宜行える人的ネットワークができています。概ね毎週 2 回程度のペースで JAXA 出張を行い実験等を行うと共に、JAXA 研究員の専門知識による助言を受けることができ、新たなテーマ掘り出しや取得データ設定などを無駄なく行う事ができた。

また、類似の研究である CNT による CFRP 強化をテーマの一つとしている他大学の研究者にオブザーバとなってもらい意見交換を行うと共に、互いの研究成果を披露しあって新たな課題を見出す事などができた。さらに、解析に関しては日本における CFRP 破壊解析の権威と内外に認められている他大学の研究者に同じくオブザーバとなってもらい、解析に関する多くの示唆を得た。実際の解析はその先生の弟子であり、かつ JAXA 複合材センターの職員で破壊解析を重点的に行っている研究員の指導を全面的に受けて実施した。

●**研究実施において得られた派生的な知見・成果**； CNT 樹脂膜の成膜が大きな課題であるとして研究に取り組んできたが、成膜業者の設備や経験により所期の薄膜を入手する事が可能となった。その過程で、当該業者の有するスクリーン印刷技術によって CFRP に優れた導電性や耐雷性などの機能性を付与できる可能性を確認する事ができ、新たに派生的な知見を得る事ができた。定量的なデータの入手はできていないが、新たな研究テーマになり得る可能性がある。機会があれば取り組むべきテーマと信じている。

1. 5 研究実施体制とマネジメント

研究代表者が全体計画を立案し、傾斜機能型 CFRP の品質・力学特性を評価する役割を担当した。他方、共同研究者は傾斜機能型 CFRP の成形に関する研究開発を担当した。また、研究計画および成果のレビューを行うために、当該研究分野の最先端の研究者にオブザーバをお願いする体制とした。また、中間報告を防衛省の P0 や関係者に対して毎年行い、計画と成果の確認および適宜修整等を行ってきた。強度試験などは学生のアルバイト作業として実施したが、試験実施は研究代表者、試験統括者および JAXA 試験員の指導の下で実施し、確実なデータ取得が行える体制を整えた。解析は本学の大学院生が JAXA の研究者の指導を受けつつ実施したが、指導を直接受けられるように JAXA の研究生として登録し、定期的に JAXA において解析作業を進めた。

傾斜機能型 CFRP の成形技術の研究開発を行う共同研究者とは定期的に意見交換や情報交換を行い、計画進捗に齟齬をおこさないように務めてきた。これらの活動を通じて、概ね順調に研究を進めることができた。

1. 6 経費の効率的執行

本研究は、作業としては CNT 樹脂薄膜の製作、傾斜機能型 CFRP 大板の成形、及びその大板から試験用供試体を切出して破壊し評価する事が大半となる。CNT 薄膜の製作は専門業者へ外注し、所定の薄膜の入手は可能となったが、一方、外注方式では研究途中での仕様変更などに素早く対応できず、特注品であるために価格も高く追加発注による経費への影響は看過できない状況であった。また、薄膜製作に関する開発情報は成膜企業のノウハウであり当方へは開示されないため、研究の観点からの技術情報が得られず、樹脂膜の評価や改善を直接は行えなかった。

そこで、共同研究者によって CNT 樹脂薄膜の成膜も行う事とし研究の深化を図ったが、そのために成膜設備の導入が必要となった。一方、JAXA などの公的機関では中古の設備は導入する事はできず、経費低減を積極的に行えないが、本研究体制ではそれが可能である。そこで、設備等に関しての導入は中古の購入を原則とし、積極的に経費の低減を図ってきた。中古設備は性能において劣る物ではなく、かつ新品に比べて半額以下から一桁近く低い価格で購入できており、経費の効率的執行を行えている。