低温下における金属－CFRP 接合材の耐衝撃性評価に関する研究

岡山理科大学　機械システム工学科
教授　中井　賢治
（2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022032-B3）

キーワード：接着接合，熱溶着接合，アルミニウム合金，炭素繊維強化プラスチック(CFRP)，円柱状突合せ継手，引張特性，変形速度，温度

１．研究の背景と目的

近年，自動車等の工業製品の軽量化の手段として，アルミ合金や鋼材等の金属材料と CFRP（炭素繊維強化プラスチック）等の樹脂材料を組み合わせる「マルチマテリアル化」が提唱されているが，この実現には異種材料間の接合技術が重要である．特に，CFRP は軽量かつ高い強度と剛性を有する一方，材料・製造コスト等の課題から，金属等の主要材料との異材接合が不可欠である．現状，CFRP と金属の接合で主に用いられている接着接合には経年劣化等の問題があり，それに代わる接合方法として，レーザ接合 [1] や摩擦攪拌接合 [2] 等の直接接合が実施されている．しかし，異材接合継手の機械的特性については，主に板材を用いた静的引張せん断試験による評価 [3] が中心となっており，丸棒材を用いた静的・動的負荷下での直接引張試験による機械的特性評価はほとんど行われていない．

本研究の目的は，CFRP（カーボン／PEEK 複合材）と金属（アルミ合金 7075-T651）の異材円柱状突合せ継手を接着接合ならびに直接接合（熱溶着）によって製作し，両者に対して静的・衝撃引張試験を実施し，機械的特性（引張強度と破壊時の変形量）に及ぼす接合方法と変形速度の影響を調べることである．また，直接接合材の機械的特性に及ぼす温度（室温と低温）の影響も調べた．

２．試験片の製作方法

2・1　供試材

供試材として，CFRP には O-KEI 樹脂社製の一方向強化カーボン／PEEK 複合材で直径約 8 mm の丸棒材を使用した．炭素繊維（T700 相当）の繊維体積含有率は約 50%である．金属には UACJ 社製の直径約 20 mm のアルミ合金 7075-T651 の丸棒材を使用した．PEEK 樹脂には三ツ星ベルト社製の直径約 8, 16 mm の丸棒材を使用した．

2・2　試験片の形状寸法

供試材の丸棒材から CFRP と金属それぞれについて，中実円柱状試験片を機械加工により製作した．ここで，CFRP 丸棒はねじ切り加工が困難であるため，引張試験用治具（アルミ合金 7075-T651 製）との接着を行い，CFRP 側試験片とした．CFRP とアルミ合金それぞれの中実円柱状試験片の形状寸法を図 1 に示す．

2・3　接合界面の表面処理

CFRP とアルミ合金各試験片の接合界面に対しファイバレーザマーカ（プロフィテット社製）を用いて格子（格子間距離 d≒0.1mm）状のレーザ処理を行った．表面処理前後の接合界面について，走査型電子顕微鏡(SEM)で観察を行った写真を図 2 に示す．

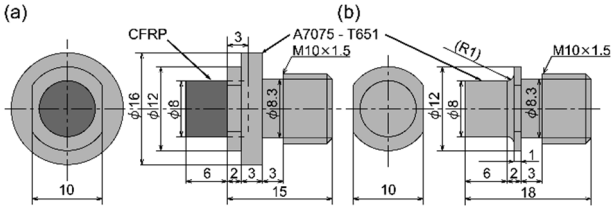


図 1　CFRP とアルミ合金の中実円柱状試験片の形状寸法，(a) CFRP　(b) アルミ合金

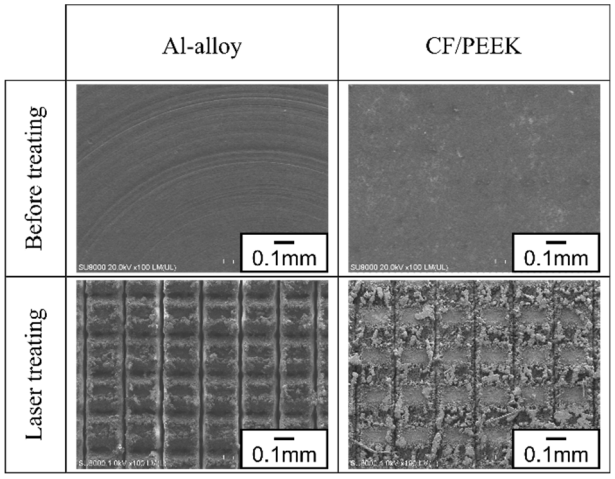


図 2　レーザ表面処理前後のアルミ合金と CFRP 接合面の SEM 写真（倍率：100 倍）

2・4　接着接合継手の製作方法

図 1 で示した CFRP とアルミ合金の中実円柱状試験片同士を 2 液混合型エポキシ系接着剤(3M Japan, Scotch-weld™ DP-460)を用いて突合せ接着することにより接合継手を製作した．接着時の概略図を図 3(a)に示す．接着前後の試験片全長をデジタルマイクロメータ(Mitutoyo, MDC-25M, MDC-50MX)により測定することで接着層厚さを測定した．

2・5　直接接合（熱溶着）継手の製作方法

CFRP（カーボン／PEEK 複合材）丸棒の接合界面に，接合補助材（PEEK 樹脂の丸棒材から製作した厚さ約 500 μm の円板）を熱溶着により接合したのち，その補助材を介し

て，図 1(b)にて示したアルミ合金の中実円柱状試験片と突合せ熱溶着することで直接接合継手を製作した．熱溶着時の概略図を図 3(b)に示す．CFRP 丸棒側については，熱溶着実施後に加工及び引張試験用治具との接着を行うことで，図 1(a)で示した CFRP 側中実円柱状試験片に準ずる形状の試験片を製作した．

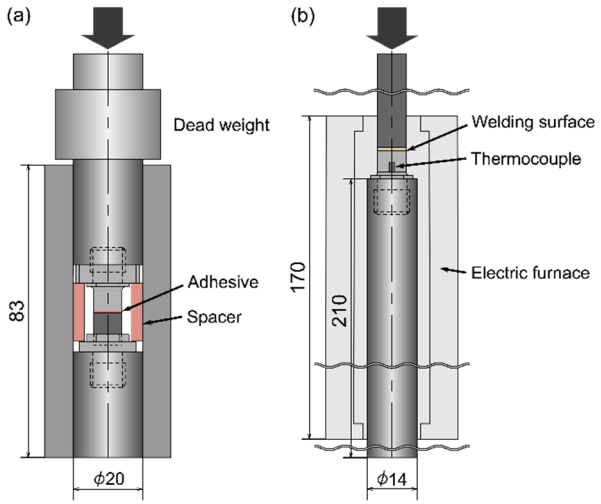


図 3　CFRP とアルミ合金の接合時の概略図
(a) 接着接合　　(b) 熱溶着接合

3．試験方法

3・1　静的引張試験

インストロン社製万能試験機（モデル 5500R）を用いて，低速度による引張試験を行った．接着・直接接合継手試験片を試験機の上下治具間にネジ結合により取り付け，一定クロスヘッド速度 1 mm/min で試験片が破壊するまで引張負荷を行った．

3・2　衝撃引張試験

ホプキンソン棒装置を用いて，衝撃引張試験を行った．この装置の概略図を，図 4 に示す．本装置は，直径 16 mm，長さ 2500 mm の入出力棒（アルミ合金 7075-T6）と打ち出し円管（アルミ合金 7075-T6）から構成されている．接着・直接接合継手試験片を入出力棒間にネジ結合で取り付け，打ち出し円管を約 6 m/s で発射させて試験を実施した．試験方法の詳細については，過去の文献 [4] を参照されたい．

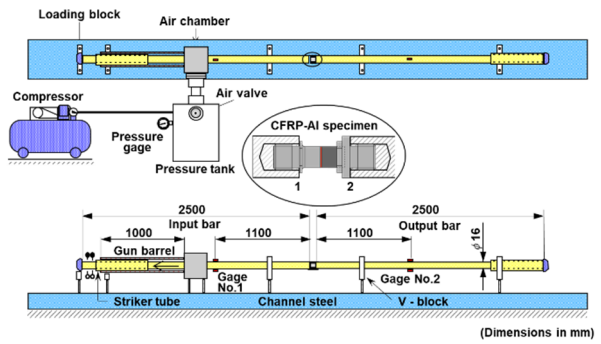


図 4　引張型ホプキンソン棒装置の概略図

4．試験結果及び考察

CFRP（カーボン／PEEK 複合材）とアルミ合金 7075-T651 の接着接合継手ならびに直接接合継手の引張荷重－変形関係を図 5，6 にそれぞれ示す．接着接合継手において，衝撃試験（実線）での初期の傾き（初期剛性）と引張荷重の最大値は，静的試験（破線）でのそれらよりも顕著に増加している．直接接合継手においても同様の傾向は確認できるが，接着接合継手の結果と比べるとわずかな増加となっている．また，両接合継手において，衝撃試験での破壊時の変形量は静的試験でのそれよりも小さくなっている．そして，変形速度に関係なく，直接接合継手の変形量は接着接合継手のそれよりも大きくなっている．この傾向は，直接接合継手の製作において接合補助材として用いた PEEK 樹脂の変形量が大きいことによるものであると考えられる．この考察として，PEEK 樹脂とアルミ合金 7075-T651 同士についても，両材料で図 1(b)に示したアルミ合金側中実円柱状試験片と同形状のものを用いて突合せ熱溶着によって直接接合継手を製作し，静的・衝撃両試験を実施して比較を行う．

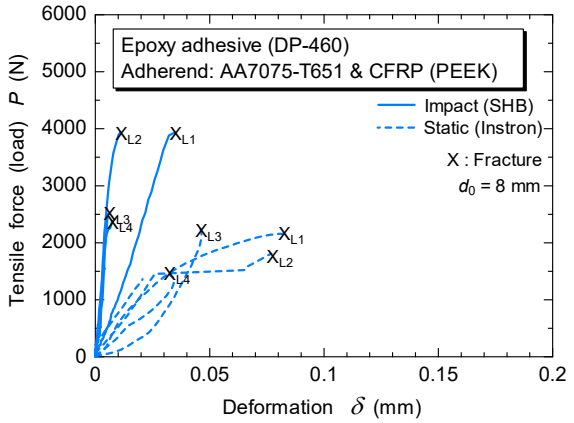


図 5　カーボン／PEEK 複合材とアルミ合金 7075-T651 の接着接合継手の引張荷重－変形関係

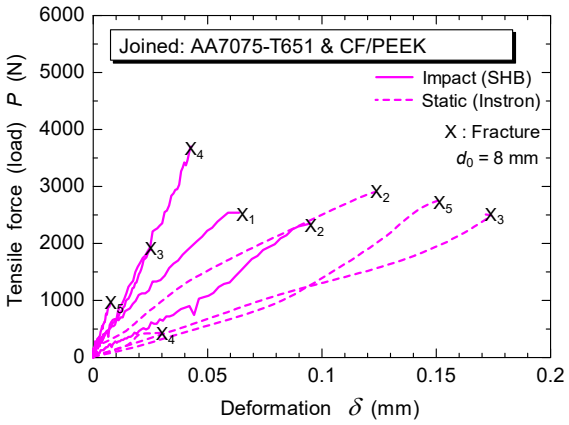


図 6　カーボン／PEEK 複合材とアルミ合金 7075-T651 の直接接合継手の引張荷重－変形関係

CFRP（カーボン／PEEK 複合材）とアルミ合金 7075-T651 の接着・直接接合継手ならびに PEEK 樹脂とアルミ合金 7075-T651 の直接接合継手における引張強度と破壊時の変形量を，破壊時の変形速度$\dot{\delta}_f$（$\dot{\delta}_f = \delta_f/t_f$；ここで t_f, δ_f はそれぞれ破壊開始時間と破壊時の変形量を示す）に対してプロットした結果を図 7，8 に示す．どの接合継手においても，変形速度が上昇すると引張強度は増加しており，その増加率は直接接合継手よりも接着接合継手の方がわずかに大きくなる傾向が認められる．また，破壊時の変形量の変形速度依存性については，接着接合継手よりも直接接合継手の方が大きくなっている．そして，CFRP－アルミ合金と PEEK 樹脂－アルミ合金の両直接接合継手の引張特性の変形速度依存性は，ほぼ同じ傾向となっている．このことから，CFRP とアルミ合金の直接接合継手における引張特性は，接合補助材として用いた PEEK 樹脂の特性による影響が大きいと考えられる．

引張特性に及ぼす接合方法ならびに変形速度の影響について考察を行うため，試験後の破面について巨視的観察及び SEM を用いた微視的観察を行った．それらの結果を接着接合継手について図 9，10 に，直接接合継手について図 11，12 にそれぞれ示す．図 9 より，接着接合継手では巨視的観察においてアルミ合金側に大半の接着剤が付着していることが確認できる．しかし，図 10 の微視的観察では，接着接合ならびに各試験実施前の図 2 と比較すると，両材料の破面にて表面処理が施された凹部を中心に，破面全体への接着剤の付着が確認できており，接着接合継手の破壊箇所は CFRP 側界面ではなく接着層内での破壊が支配的であると考えられる．また，図 11 より，直接接合継手では巨視的観察において CFRP 側に接合補助材の PEEK 樹脂の大部分が付着していることが確認できる．そして，図 12 の微視的観察では，直接接合ならびに各試験実施前の図 2 と比較すると，アルミ合金側にて表面処理が施された凹部内に接合補助材の PEEK 樹脂が入り込んでいることが確認できる．このことから，直接接合継手の破壊箇所は，表面処理凹部に入り込んだ接合補助材の PEEK 樹脂部であると考えられる．以上のことより，直接接合継手の破壊箇所は接合補助材の PEEK 樹脂部が中心となっているため，その破壊挙動は PEEK 樹脂の特性の影響を強く受けることから，図 7，8 の結果の妥当性を裏付けている．

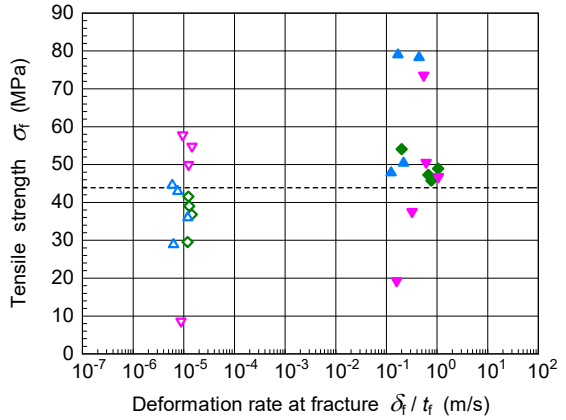


図 7　カーボン／PEEK 複合材とアルミ合金 7075-T651 の接着・直接接合継手及び PEEK 樹脂と 7075-T651 の直接接合継手における引張強度に及ぼす変形速度の影響

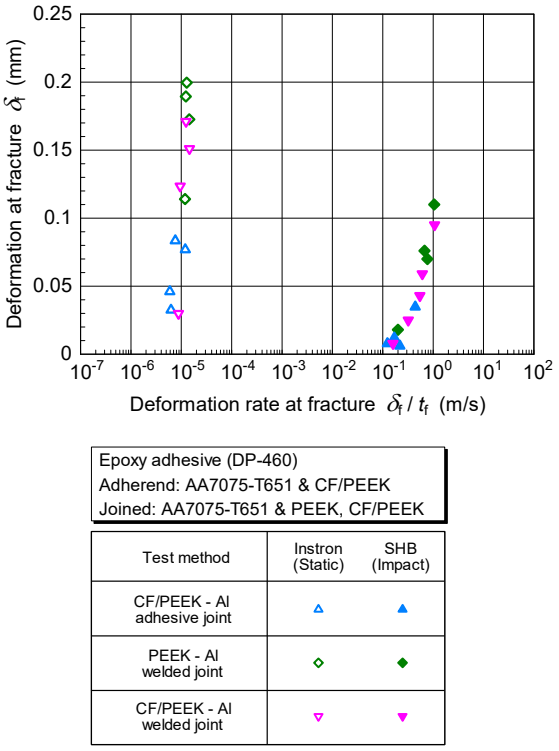


図 8　カーボン／PEEK 複合材とアルミ合金 7075-T651 の接着・直接接合継手及び PEEK 樹脂と 7075-T651 の直接接合継手における破壊時の変形量に及ぼす変形速度の影響（下側の図は図 7，8 の凡例を示す）

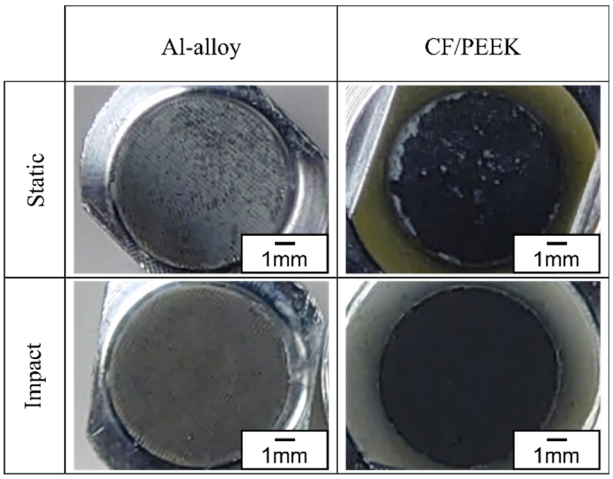


図 9　カーボン／PEEK 複合材とアルミ合金 7075-T651 の接着継手の静的・衝撃引張試験後の巨視的破面

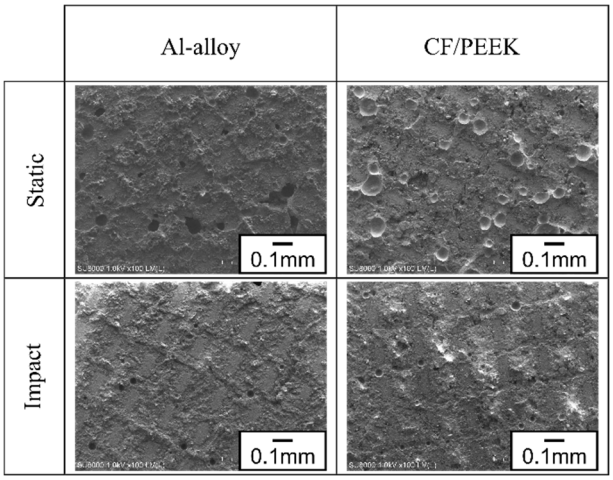


図 10　カーボン／PEEK 複合材とアルミ合金 7075-T651 の接着継手の静的・衝撃引張試験後の破面 SEM 写真

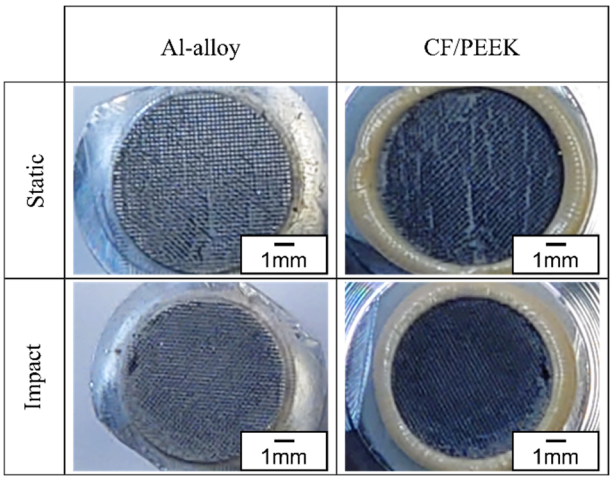


図 11　カーボン／PEEK 複合材とアルミ合金 7075-T651 の直接接合継手の静的・衝撃引張試験後の巨視的破面

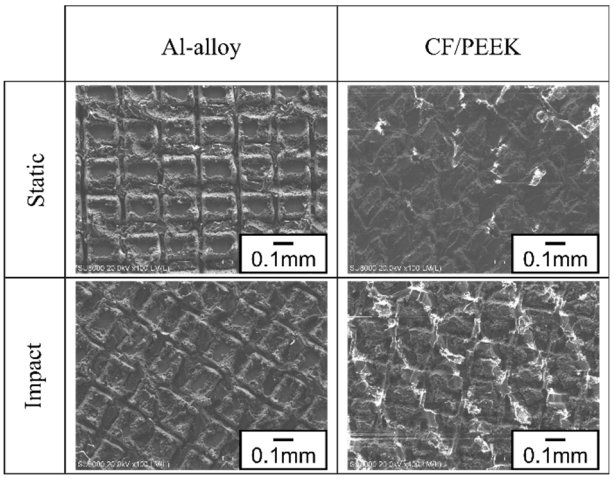


図 12　カーボン／PEEK 複合材とアルミ合金 7075-T651 の直接接合継手の静的・衝撃引張試験後の破面 SEM 写真

５．直接接合継手の低温下での耐衝撃性

CFRP（カーボン／PEEK 複合材）とアルミ合金 7075-T651 の直接接合継手試験片を使用して，室温及び低温下で静的及び衝撃引張試験を行い，継手強度を決定した．衝撃試験では図 4 に示すホプキンソン棒装置を使用し，低温においては図 13 に示すように試験片をドライアイス・エタノールと液体窒素中に浸漬させながら試験を行った．その結果データを，表 1 に示す．どの負荷速度においても，試験片温度 25～–50℃では，温度が低下するとともに継手強度は増加している．一方，液体窒素雰囲気下(T=–196℃)において静的･衝撃負荷下での継手強度が急激に低下している．これは，CFRP 試験片と引張試験用治具（アルミ合金）との接着が低温により一部剥がれてしまったことが原因であると考えられる．その点について，今後詳細な考察を行っていき，耐寒性・耐衝撃性を有する工業用製品の開発を目指していく予定である．

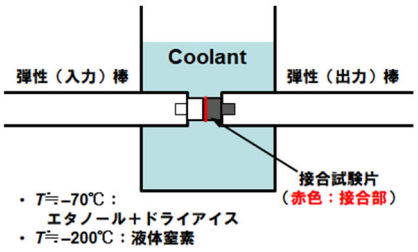


図 13　低温下での継手試験片の衝撃引張試験の様子

表 1　カーボン／PEEK 複合材とアルミ合金 7075-T651 の直接接合継手の室温・低温下における静的及び衝撃引張（継手）強度値

T (℃)	25	–50	–196
Static (MPa)	55	62	18
Impact (MPa)	73	81	15

６．結　言

CFRP（カーボン／PEEK 複合材）と金属（アルミ合金 7075-T651）の異材円柱状突合せ継手を接着接合及び直接接合（熱溶着）によって製作し，静的・衝撃引張試験を実施し，その機械的特性に及ぼす接合方法と変形速度の影響を調べた．また，直接接合試験片においては，静的・衝撃引張強度に及ぼす温度（室温と低温）の影響を調べた．以上の結果から，次のような知見を得た．

(1) 直接接合継手の引張強度は，接着接合継手のそれよりも高くなる傾向が静的試験において確認できたが，同傾向は衝撃試験では確認できなかった．これは，両接合継手の引張強度に対する変形速度依存性の差によるものであると考えられる．

(2) 直接接合継手の破壊時の変形量は，どの変形速度においても接着接合継手のそれよりも大きくなった．また，変形速度が大きくなると，両接合継手において破壊時の変形量は小さくなった．

(3) SEM による破面の微視的観察より，接着接合継手では接着層内部での破壊が，直接接合継手では接合補助材（PEEK 樹脂）内部での破壊が支配的であることが確認できた．

(4) 直接接合継手の引張強度は，試験片温度 25～–50℃では，温度が低下するとともに増加している．

謝　辞

本研究は，公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成（塑性加工）を受けて行われた．天田財団ならびに関係者各位に深く御礼申し上げる．また，元本学大学院生の清水 海翔 君（現，ナカシマプロペラ株式会社）の協力により，本研究の実験を進めることができた．さらに，本研究で使用したアルミ合金 7075-T651 材は株式会社 UACJ 様よりご提供いただいた．以上，ここに記して，感謝の意を表する．

参考文献

1) Y. Ye, Q. Zou, Y. Xiao, J. Jiao, B. Du, Y. Liu and L. Sheng: *Micromachines*, 12-2 (2021), 179.

2) 永塚公彬・田中宏宜・肖　伯律・土谷敦岐・中田一博 : 溶接学会論文集, 33 (2015), 317.

3) S. Wang, W. Liang, L. Duan, G. Li and J. Cui: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106 (2020), 2569.

4) 中井賢治・ムハマドスヨド シティヌルハニム : 材料試験技術, 66-4 (2021), 160.