電磁力を駆使した高速マルチプロセスによる異種材料接合技術の開発

千葉大学　機械工学科
教授　糸井　貴臣
（2022 年度 一般研究開発助成　AF-2022022-B3）

キーワード：電磁圧接，異材接合，CFRP，かしめ，転写

１．はじめに

輸送機器の軽量化は燃費改善とともに CO_2 排出量の低減化に貢献する．図 1 に示す様に，特に航空機で実績のある CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics : 熱硬化性の炭素繊維複合材料）の需要およびその市場規模は，2016 年の 1.3 兆円から 2030 年では 4.5 兆円まで増大すると予測されている [1]．

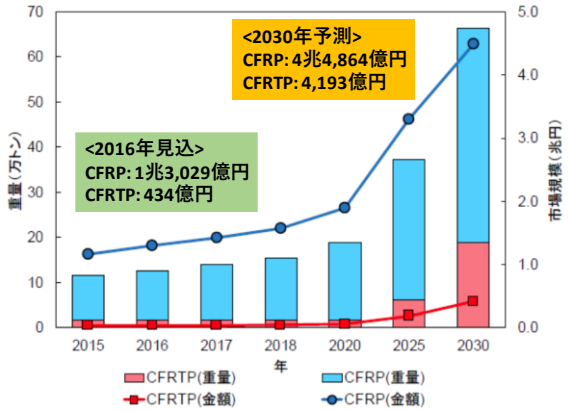


図 1　炭素繊維関連産業の市場規模の予測

B787（ボーイング社）および A350（エアバス社）の航空機の構体において，軽量化を目的とした CFRP の使用率が 50%を超える事は広く知られている [2]．さらに自動車の構体にも CFRP による軽量化が実用化されている．CFRP は主に軽金属の代替材料として用いられるが，構体全てに CFRP が採用されるわけではなく，適材適所に採用される所謂マルチマテリアル構造となっており，CFRP の実装率向上に異種材料接合技術が不可欠となる．

電磁圧接は電磁力により生じる衝撃力を利用した固相接合法であり，同種または異種金属同士の強固な接合が可能である [3]．電磁圧接では，板の表面近傍の塑性変形により接合が達成できるという特徴を有する．電磁圧接は力学的エネルギー源として電磁力を用い，可動板を高速変形・衝突させる塑性変形を利用した接合法である．

本研究では不等辺アングル（コの字型）を固定板の代わりに用いることで，電磁力による可動板と不等辺アングルの「固相接合（電磁圧接）」のみならず，アングルに挿入された樹脂板との「かしめ」，およびアングルの CFRP への「圧入（転写）」，を同時に可能とする高速マルチプロセスにより金属板と炭素繊維複合材料板の強固な異種材料接合を，固相接合と機械的締結の「ハイブリッド接合法」での実現を目的とする．

２．実験方法

図 2 に電磁圧接装置の断面模式図を示す．本実験では E 字形平板状ワンターンコイルを用いた．間隙 1.0mm を設けてコイルの上面に試料を配置する．電磁圧接ではコイルに大電流を流すことで可動板（下側）に上向きに電磁力が発生し，高速度で変形し，固定板（上側）に衝突してシーム状に接合される．

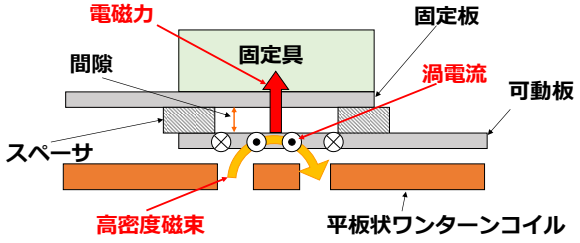


図 2　電磁圧接装置の断面模式図

本研究における接合手法の基本構想を図 3 に示す．図では，可動板と不等辺アングル（コの字型）に A6063（アルミニウム合金）を，また，樹脂板として PC（ポリカーボネート：熱軟化性樹脂）を用いて接合した結果を示す．電磁圧接と原理は同じだが，①不等辺アングル（コの字型）を固定板の代わりに用いること，②電磁力による可動板と不等辺アングルの「固相接合（電磁圧接）」のみならず，アングルに挿入された CFRP 板の加工溝への圧入（転写）を同時に行った．電源容量は 400μF，放電エネルギーは 3.0kJ で実験を行った．可動板に用いた A1050H24 アルミニウム(Al)板は幅 100（幅）×80（長さ）×1.0mm（厚さ）である．絶縁材料である CFRP 板は，カーボンファイバーを熱硬化性のエポキシ樹脂でホットプレス成型して生産されたものを使用した．カーボンファイバーとエポキシ樹脂の重量比率は 6:4 であり，厚さは 3.0mm である．図 4 に本実験で用いた 3 閉面不等辺アルミニウムチャンネルの寸法と外観写真を示す．転写に配慮して A1050-H24 を用いて自作した．作製した接合板の外観写真と断面模式図を図 5 に示す．

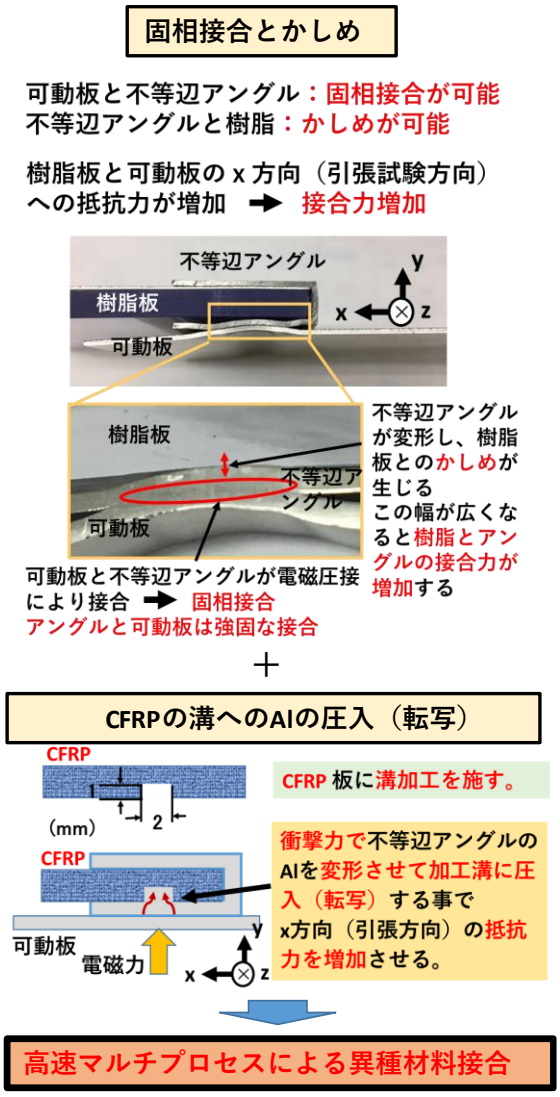


図 3　本研究における接合手法の基本構想

引張りせん断試験により接合部の強度を測定した．試験片は，電磁かしめ加工後の材料を，接合部が中心に来るように 10×80 mm の長方形に切り出したものを使用した．CFRP 板により両端の高さを調整することで，曲げの力が入らないように試験を実施した．試験装置には島津オートグラフを用いた．

３．実験結果

図 6 に不等辺アングルと CFRP 板にともに溝加工を施していない状態で接合を行った接合板の断面写真を示す．不等辺アングル間では CFRP 板とのかしめ（機械的接合），また，Al 板と不等辺アングル間で圧接（固相接合）が同時に行われている．しかし，Al 板とアングルで 1.5mm 幅と十分な固相接合が出来ているにもかかわらず，アングルの変形量が小さいため，かしめによる拘束は緩く，手で容易にチャンネルから CFRP 板を外すことができてしまうため，拘束力は不十分であった．

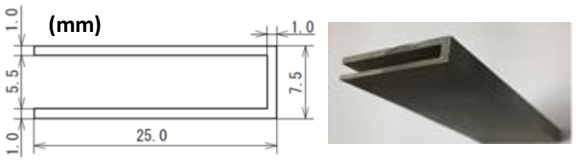


図 4　3 閉面不等辺アルミニウムチャンネルの寸法と外観写真



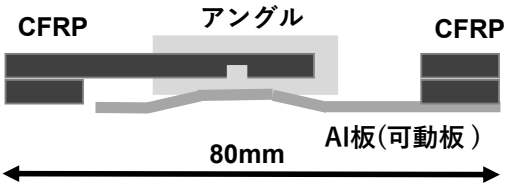


図 5　作製した接合板の外観写真と断面模式図

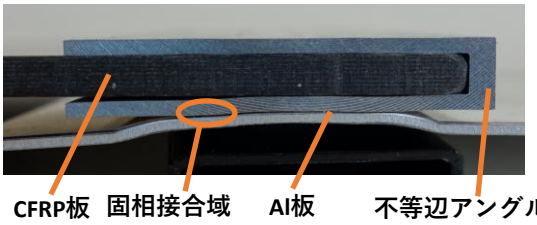


図 6　CFRP 板に溝加工がない接合板の断面写真

上記の結果から，不等辺アングルと CFEP 板にともに加工溝を施した後に接合を行った．CFRP 板に凹部を，またアングルに凸部の加工を施し，CFRP をアングルに固定した状態で Al 板と接合した．図 7 に(a)断面の外観写真（せん断方向を矢印で示す）および(b)接合部の拡大写真を示す．

CFRP 板とアングル間のかしめにおいて凹部のみ作った場合では CFRP 板を手で外すことはできず，加工していない場合よりも強い拘束力を得ることができた．図 7(b)より Al 板とアングル間の圧接においては偏りなく左右対称に接合部が形成されていることがわかる．引張りせん断試験を行った結果，接合部は約 70MPa で剥離した．Al 板 (A1050-H24)の 0.2％耐力および破断強度はそれぞれ 75MPa および 100MPa であることから，チャンネルと Al 板は良好な接合状態であることがわかる．CFRP 板に凹部，

アングルに凸部を作ることで，固定された接合対象に電磁圧接を行う従来方法に近い条件で接合を行うことができた．このことから，より従来方法に条件を近づけ強い接合強度を得られると考えられる．

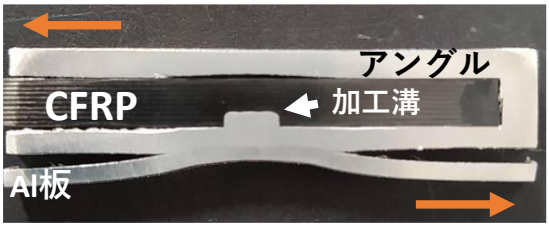


図 7 (a)　CFRP 板とアングルに溝加工を施した接合板の断面写真

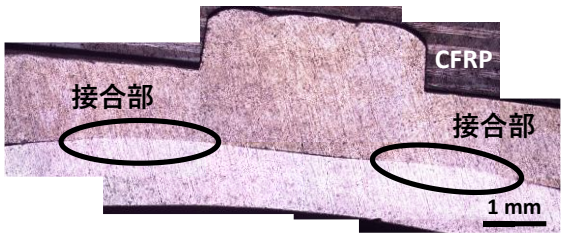


図 7 (b)　接合部の拡大写真

そこで凹部と凸部を位置変更（上下を変更）して電磁圧接を行った．図 8 に(a)断面の外観写真および(b)引張りせん断試験後の試験片の外観写真を示す．Al 板とアングル間の圧接においては図 7 と同様に偏りなく左右対称に接合部が形成されていたが，引張りせん断試験において，約 37MPa でアングルの大きな塑性変形を生じた．その原因は試験片の形状にあると考えられる．図 8(b)に示す通り，強度を確保したい固相接合部は試験片の中心部ではなく端にあり，荷重をかけるとコの字型をしたアングルの肩部分に曲げモーメントがかかってしまう．凸部が可動板側にある場合は噛み合い部分に荷重がかかるためアングル肩部への曲げモーメントが生じなかったが，位置変更により試験機による荷重が曲げモーメントとして直接アングル肩部にかかってしまったと考えられる．従って，凸部を固定具側へ位置変更すると，せん断方向への荷重がかかった場合に固相接合部の強度だけでなく，アングル素材の強度も考慮する必要があるとわかった．しかし，アングルの変形を抑えながらも耐力の半分程度まで構造的に強い拘束力を得ることができた．

CFRP 板とアングルに何も加工を施さなかった場合，CFRP 板とアングルのかしめにおいて十分な拘束力を得ることができなかった．そこで，噛み合いによる構造的な拘束力を得るため CFRP 板とアングルそれぞれに凹部と凸部を施した結果，より強い拘束力を得ることができた．狙い通り，衝撃力によってかしめられた凹凸の噛み合い部分が構造的な拘束力を発揮したためである．しかし実用性を考慮した場合，加工の複雑化は工程数の増加や加工の難易

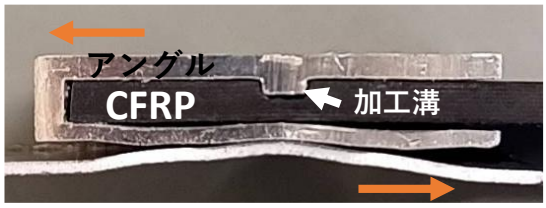


図 8 (a)　凹部と凸部を位置変更（上下を変更）して得られた接合板の断面写真



図 8 (b)　引張りせん断試験後の試料片の外観写真

度上昇によるコストの増加を招くため望ましくない．従って，必要最低限の加工工程によって圧接とかしめのどちらにおいても十分な強度と拘束力を得る方法が求められる．

そこで，チャンネルに凸部を設けず，CFRP 板に凹部の溝加工のみで実験を行った．電磁圧接では可動板(A1050H24)は 200m/s 以上の速度で固定板に高速衝突する．その際，可動板は数 GPa という高い衝突圧力でアングルに衝突するが，CFRP 板に溝加工を施した場合，アングルの Al が衝撃変形により凹部に流入しその形状が転写されると期待される．この事は接合プロセス中にアングルが凸部を形成して構造的な拘束力が得られる可能性を示唆する．

図 9 に CFRP 板のみ溝加工（溝深さ 1.0mm）を施して凹部を作った(a)断面写真，(b)接合部の拡大像および(c)引張りせん断試験後の試験片の外観写真を示す．

(a)からは Al 板（可動板）変形頂点部近傍の加工溝にアングルの Al（可動板側）が加工溝に圧入されている様子がわかる．このことは図 7(a)と同様の形状が接合プロセス中に形成されたことを意味しており，せん断方向への構造的な拘束力を得ることができたと考えられる．凹部に圧入されたアングルによって CFRP 板を手で外すことはできず，加工をしていない場合よりも強い拘束力を得ることができた．(b)の拡大図より可動板にとアングルは左右対称に接合がなされており，CFRP 板の凹部にアングルが圧入されて凹部が転写されている様子がわかる．しかし CFRP 板とアングルは 100μm 程度離れており，完全に密着しているとは言い難い．引張りせん断試験を行った後の外観写真を(c)に示す．引張りせん断試験を行ったところ約 20MPa で写真中に丸で示したようにアングルが変形して凹部より外れた．CFRP 板の溝深さを 0.5mm として同様に接合実験を行った後に引張りせん断試験を行ったところ，約 10MPa で凸部より外れた．この結果から，溝に圧入されたアングルが構造的に CFRP 板と拘束されていても，CFRP 板の溝部とアングルの圧入部が外れる方向に分力が生じるためであると考えられる．

そこで, CFRP 板の加工溝をインターロック形状として，そこにアングルの Al を圧入できればより強い拘束力が得られると考え，CFPR に溝加工を施した．図 10(a)にインターロック形状の溝加工（溝深さ 1.0mm）を施した CFRP 板の断面写真および(b)接合後の断面像を示す．(a)には破線でインターロック形状を示す. 板の中央部に向かって加工幅が広がる形状を有していることから，圧入された Al はせん断方向に対して加工溝に拘束されると考えられる．(b)からは接合後に加工溝に対してアングルが圧入されている様子がうかがえ，加工溝の凹部に Al が転写されていることがわかる．図 10(c)は接合部の拡大図を示す．可動板は図 9(b)と同様に左右対称に固相接合されており，アングルと良好な接合状態であった．また，インターロック形状の加工溝に Al が転写され圧入されている様子もうかがえた．一方，四角で囲った領域では，CFRP が破損している様子も観察された．これはアングルが CFRP 内に衝突した際に破損した部分と考えられる. この部分の拡大像を図 10(d)に示す.

拡大像からは破損した CFRP の溝内にも Al が圧入されており，また CFRP と Al 間には隙間は観察されない．このことは Al が加工溝に隙間なく圧入されたことを意味している．この理由については十分に解明できていない．図 9(b)のように CFRP と Al 間に隙間ができた理由について，Al が CFRP に圧入された際の反発が考えられる．電磁圧接では，瞬間的に数 GPa の高い圧力がかかるため，樹脂で構成される CFRP 板では圧入時に CFRP 自身の弾性的な変形に起因して反発を生じる．つまり，インターロック形状には，圧入後の反発力による Al の離脱を拘束する役割もあることが，CFRP の破壊の際に生じた破壊に起因する細かい溝にも Al が圧入された要因と考えられる．引張りせん断試験を行ったところ約 40MPa でアングルが変形して凹部より外れた. 溝形状をインターロック型にすること



図 9 (a)　CFRP 板のみ溝加工を施して凹部を作った接合板の断面写真

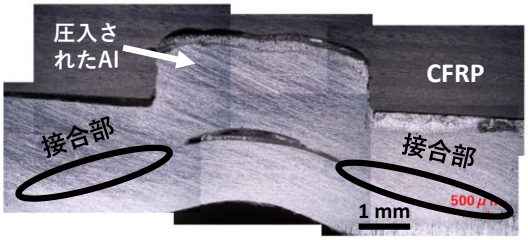


図 9 (b)　接合部の拡大写真

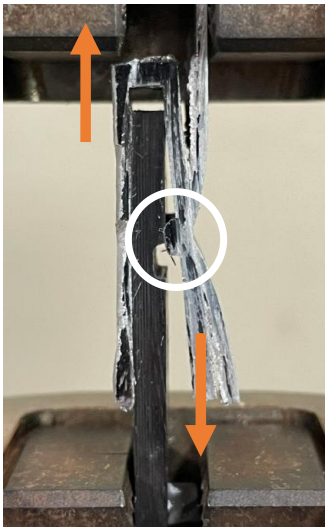


図 9 (c)　引張りせん断試験後の試験片の外観写真

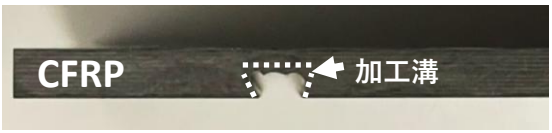


図 10 (a)　インターロック形状の溝加工を施した CFRP 板の断面写真

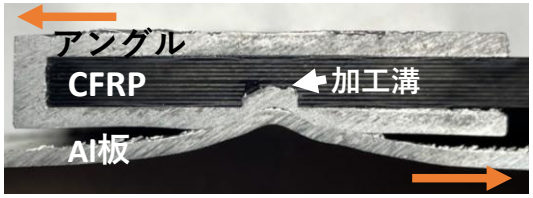


図 10 (b)　接合板の断面写真

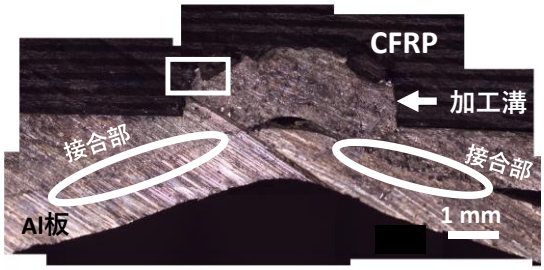


図 10 (c)　接合部の拡大写真

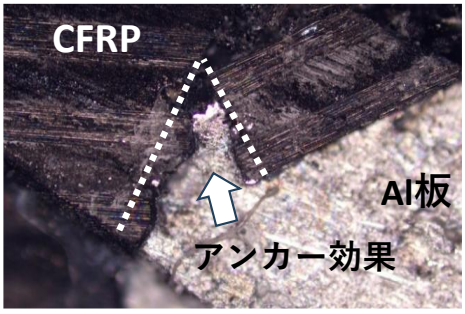


図 10 (d)　CFRP 内のアンカー部分

で, アンカー効果に起因して倍の荷重に耐える強い拘束力を得ることができた. 接着剤が構造接着に使用される場合に求められる強度は少なくとも 10MPa 以上であり，接着により得られる強度は最大でも 30MPa 程度である [4]．したがって，母材破断には至らなかったものの，引張りせん断試験においては, 現在 CFRP の接合で主に用いられる接着と比較すれば大きな引張りせん断強度が得られたといえる．

４．まとめ

1. 電磁力によるかしめ加工では，3 閉面不等辺アングルを用いることで，CFRP 板とチャンネル間のかしめ，金属板とチャンネル間の圧接を同時に行うことができた．
2. コの字型アングルを用いて加工を行った場合，加工後も手で容易にチャンネルから CFRP 板を外すことができ，かしめによる拘束力が不十分であった．
3. 凸部をもつアングルを用い，CFRP 板の凹部の加工溝と噛み合わせてから接合を行った結果, 約 70MPa で接合部剥離した．
4. アングルに凸加工を施さず，CFRP 板の深さ 1.0mm 溝加工のみを施した場合，引張りせん断試験後に約 20MPa でアングルが変形して凹部より外れた．これは CFRP 板の溝部とチャンネルの圧入部が外れる方向に分力が生じるためであると考えられる．
5. CFRP 板の深さ 1.0mm のインターロック形状の溝加工のみを施した場合，アングルの Al が加工溝に圧入・転写された．引張りせん断試験を行った結果，約 40MPa アングルが変形して凹部より外れたが，溝形状をインターロック型にすることで，アンカー効果によって，より高い荷重に耐える拘束力を得ることができた．

謝　辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成(AF-2022022-B3)の支援を受けて行われたものである．付記して感謝申し上げる．

参考文献

1)　加茂徹：廃棄物資源循環学会誌，29 (2018) P133.
2)　JMCA炭素協会(https://tansokyoukai.org/product.html)
3)　相沢友勝：塑性と加工, 44-512 (2003), pp, 957-959.
4)　佐藤千明：材料，69-8(2020)，pp. 626-629.