

近年、輸送機分野において、地球温暖化防止や地球環境保全の観点から燃費・排ガス規制が年々強化されている。また、モーターや電池の搭載による重量増加を補うために、自動車ボディの軽量化が重要な課題となっている。その解決方法の一つとしてより高強度または軽量の部材を適材適所に使うマルチマテリアル化への取り組みが必須になっている。

マルチマテリアル化の実現には、鉄とアルミニウム合金やマグネシウム合金などの軽量金属材料との金属材料同士の異材接合のみならず、さらに軽量化が期待できる樹脂材料や炭素繊維強化複合材料(CFRP)との接合までもが求められてきている。これら部材の接合方法としては、従来から多用されてきたスポット溶接のような溶融接合が適応できない組合せが多く、機械的接合法(SPR, FDS® など)や接着、それらの併用など多岐にわたり、各種の接合部に対して、その接合メカニズム、機械的・化学的特性の評価方法が課題となっている。

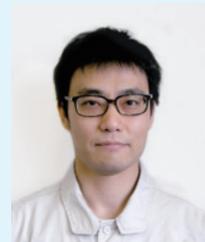
本稿では、まず第1報として、異材接合部の強度評価および破壊メカニズム評価技術とCFRP破壊挙動のCAE技術について、当社の取り組みを紹介する。



技術本部
機械・プロセスソリューション事業部
プロセス技術部
しみず ひろし
清水 洋志



技術本部
機械・プロセスソリューション事業部
プロセス技術部
なかじま しんご
中島 伸吾



技術本部
材料ソリューション事業部
材料評価技術部
やまざき しげる
山崎 秀

C-1 異材接合部の強度評価および破壊メカニズム評価技術

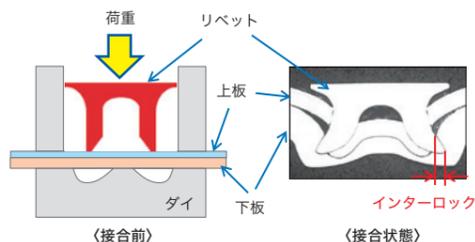
1.1 異材接合部の強度評価技術

自動車ボディのマルチマテリアル化が進むにともなって接合方法も多様化しており、溶融接合、摩擦攪拌接合、機械的接合、接着接合などが適用されている。ここでは欧州の自動車メーカーなどで実績がある機械的接合法の一種であるSPR接合を例として、鋼板とAl合金板のSPR接合の評価技術を紹介する。

第1図にSPRの接合工程の概要図を示す。下板側にダイを設置しリベットをパンチで押し込むことで、リベットは上板を貫通して下板内で径方向に押し広げられて機械的に接合される。接合強度の代表的な評価手法として引張せん断強さ(以下、TSS)や十字

引張強さ(以下、CTS)があり、評価には静的試験に加え、衝突安全性の観点から高速領域での評価が必要である。当社では第2図に示す油圧式高速引張試験をもちいて、静的~10m/sec(~20kN)での試験を行っている。最近、より実部品に近い多点接合試験片などでは高荷重での試験のニーズが高まっており、落すい衝撃試験機を応用して対応している。この場合、重たい落下により得られる大きな運動エネルギーを試験片に作用する引張負荷に変換させる機構となっており、1~10m/sec(10~50kN)の試験に対応可能である。当社では顧客ニーズに応じて、2種類の装置を使いわけ、高速領域の特性評価を行っている。今後、より高精度な特性を取得できる装置の導入を行う予定である。

第1図 SPRの接合工程



第2図 高速引張試験装置



1.2 異材接合部の破壊メカニズム評価と強度予測技術

1.2.1 メカニズム評価

第3図に各種SPR接合試験片を試作し、静的にTSSを評価した結果を示す。TSSは下板にAl合金板を用いた方が高く、また鋼板の強度区分に対するTSSの影響は、下板にAl合金板を用いた場合はわずかであるが、下板に鋼板を用いた場合は鋼板の強度が高くなるほどTSSが低下する傾向にある。SPR接合試験片の破壊モードはリベット抜け、母材破断、リベット破断などが想定されるが、本試験ではいずれもリベット抜けて破壊した。TSSはリベットの径方向への広がり具合(インターロック量、第1図参照)に大きく影響されると考えられる。そこで、TSSとインターロック量の関係を調査したところ、第4図に示すように両者は比例関係にあり、接合強度支配因子としてインターロック量で示される機械的な噛み合い量が大きく寄与していることが明らかである。このことから、SPR接合は下板が高強度材の場合のようにインターロック量が小さくなる接合には適さず、接合の方向に制限がある事がわかる。

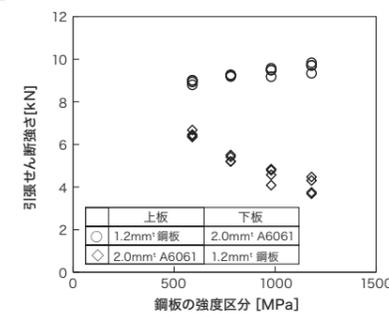
また、接合試験片の強度試験中のひずみ分布の可視化は、破壊メカニズムの検討、FEM解析の精度向上およびモデル最適化に有用である。第5図に可視化手法のひとつであるデジタル画像相

関法の試験状況を示す。試験片にあらかじめランダムパターンを付与しておき、2台のビデオカメラで撮影した画像のパターンマッチングを行い局所的な変位を計測することで、接合部の外面ひずみ分布を連続的に測定することが可能である。なお、デジタル画像相関法は画像撮影に高速カメラを用いることで10 m/secの高速引張試験におけるひずみ分布の連続測定も可能である。第6図(a)に最大荷重時の表面ひずみ分布の計測事例を示す。接合部におけるひずみ(応力)集中部の状況が明瞭に確認できている。

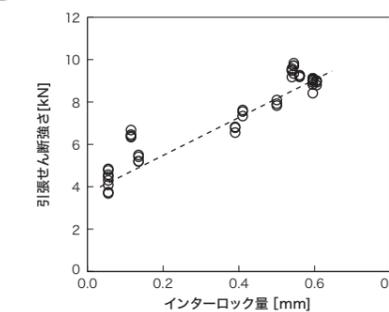
1.2.2 強度予測技術

CAE (FEM解析) 技術を用いた接合強度および破壊モードの予測は、開発プロセスの短縮や破壊メカニズムの検討に有用な手法である。第6図に引張せん断試験の最大荷重発生時における外面ひずみ分布とFEMによる解析結果の比較を示す。実測値と解析値はよく一致しており、実現象の把握のみならず、FEMの精度検証にも有効な手段となり得る。第7図にTSSにおける実測と解析の荷重-ストローク線図の比較を示す。両者はよく一致しており、FEMによる接合強度の予測も可能であると考えられる。また、第8図はFEM解析による最大荷重時における断面のMises応力分布を示している。FEMを用いることにより、実測が困難な内部の応力分布を把握することも可能となる。

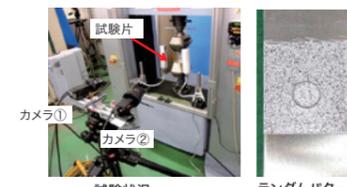
第3図 板組とTSSの関係



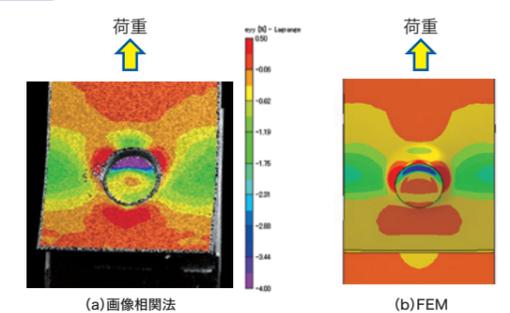
第4図 TSSとインターロック量の関係



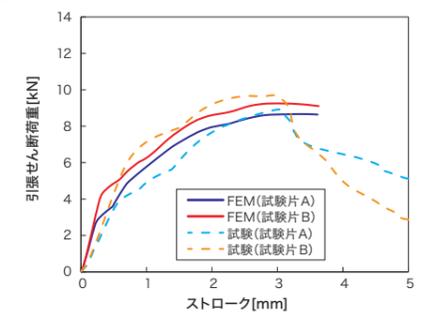
第5図 デジタル画像相関法の試験状況



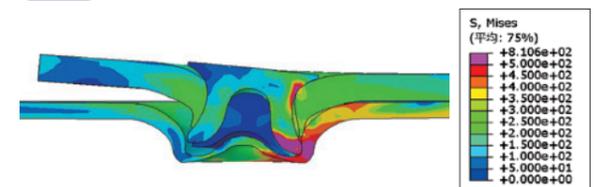
第6図 画像相関法およびFEM解析による外面ひずみ分布



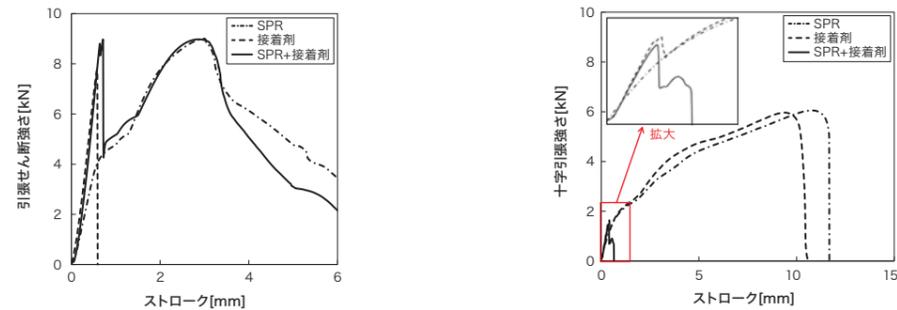
第7図 実験値およびFEM解析の荷重-ストローク線図の比較(TSS)



第8図 FEM解析による最大荷重時における断面のMises応力分布



第9図 SPR 接合、接着剤、SPR+接着剤複合接合のTSSおよびCTS



1.3 接着剤併用SPR接合部の強度評価技術

接着接合は広範囲の材料の接合が可能なことや板間の絶縁による異種金属接触腐食防止が可能なことなどから、近年、異材接合の接合方法として注目されており、接着接合および接着剤とリベットなどを併用した複合接合は、今後適用が広がると予想される。第9図にSPR接合、接着接合(エポキシ系接着剤)および接着剤とSPR接合を併用した試験片を試作し、静的にTSSおよびCTSを調査した結果を示す。試験初期における線図の傾きが大きいほど剛性に

優位であり、また線図の面積が大きいほど破壊に要するエネルギーが大きく、耐衝撃特性に優位と考えられる。したがって、接着接合は剛性に優位であるが、耐衝撃特性はSPR接合が優位である。また、接合強度はいずれもTSSの方がCTSよりも大きい。接着接合は特にTSSに比べてCTSが低く、はく離方向の荷重に弱いことがわかる。接着剤併用SPR接合は、接着接合とSPR接合の利点を共に有しており、複合接合による効果が明らかである。また、接着接合および接着剤との複合接合のFEMによる接合強度および破壊モードの予測技術についても技術開発を進めている。

C-2 CFRP破壊挙動のCAE技術

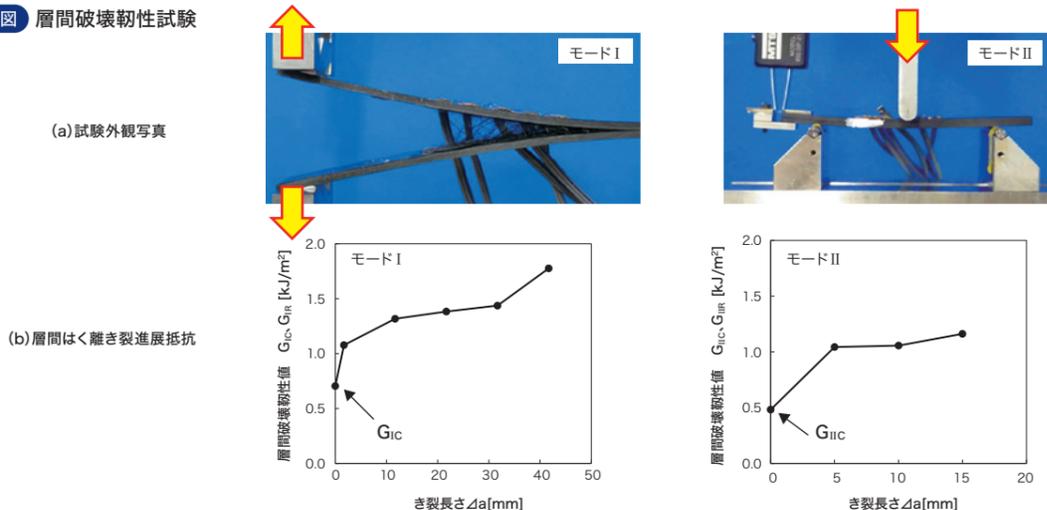
2.1 背景

航空機、自動車に対して燃費向上などを目的に複合材料(CFRP・GFRP)を適用する事例が増加している。一方で複合材料は従来用いられてきた金属材料とは異なる複雑な材料挙動(特に損傷破壊挙動)を示すことが知られている。製品部品の最適設計や開発コスト低減のためには、この損傷破壊挙動を十分に把握する必要があるが、実験のみでは複雑な挙動を理解することは難しく、合わせてCAE(FEM解析)により応力状態や各部位の損傷破壊を把握することが必要と考えている。ここでは、CFRP積層材を取り上げ、層間破壊靭性試験と静的な損傷破壊挙動のFEM解析技術を紹介する。

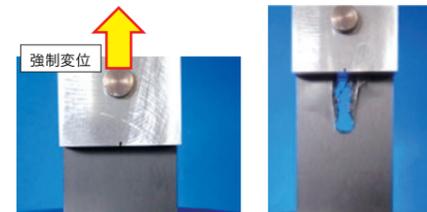
2.2 層間破壊靭性試験

層間破壊特性はCFRP積層材にとって重要な性能指標であり、静的な損傷破壊挙動を再現するには必要となる特性である。ここでは予き裂を挿入した試験片を用いて静的層間破壊靭性試験(モードI、II: 第10図(a)参照)を実施した。第10図(b)にモードIとモードIIの層間はく離き裂進展抵抗を示す。損傷発生中の層間破壊靭性値 G_{IR} 、 G_{IIR} はき裂長さ Δa とともにはく離開始時点での層間破壊靭性値 G_{IC} 、 G_{IIC} より大きくなり、いずれのモードにおいても、き裂が進展しにくい特性となっている。

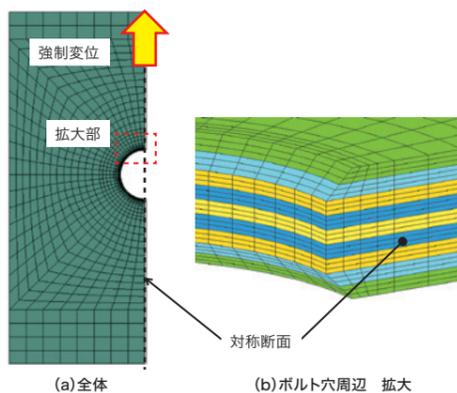
第10図 層間破壊靭性試験



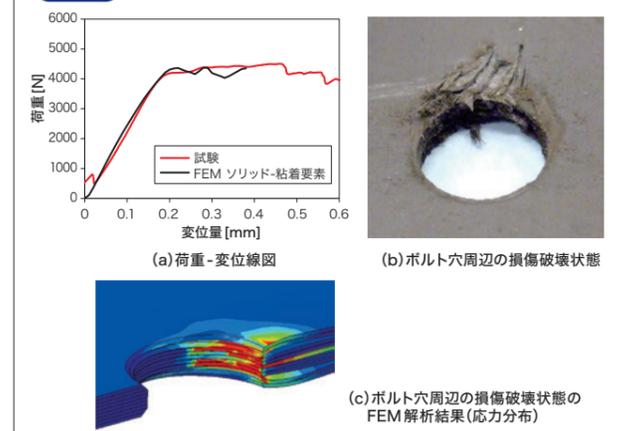
第11図 接合部静的強度試験



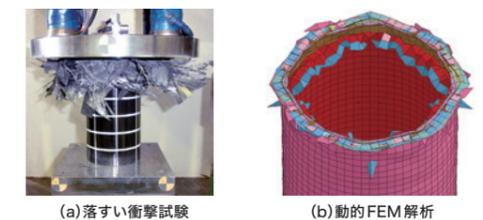
第12図 解析モデル



第13図 静的破壊FEM結果



第14図 円筒CFRP部材の落すい衝撃試験および動的FEM解析



2.3 CFRP破壊挙動とFEMモデリング

CFRP積層材の損傷破壊は繊維破断・母材破断・層間はく離に分かれ、その挙動は非線形であり荷重方向でも変化する。また積層パターンや応力状態の影響も大きく、これらを正確に表現する損傷破壊挙動モデルは現在も研究が進められている。ここではCFRP積層材の損傷破壊挙動をより詳細に再現するためにCFRPはLindeらのモデル^{*1)}を用いた。層間はく離挙動は粘着モデルを使用し、2.2節で得られた損傷発生中の層間破壊靭性値 G_{IR} 、 G_{IIR} を使用した。

2.4 静的破壊FEM解析

FEM解析対象は、第11図に示すボルト接合部を想定した接合部静的強度試験とした。解析モデルはソリッド要素および粘着要素を使用した(第12図参照)。

第13図(a)にボルト結合部を想定したFEM解析と試験結果の荷重-変位線図を示す。荷重-変位線図は試験結果とよく一致しており破壊挙動を再現できている。また第13図(b)および(c)にボルト穴周辺の損傷破壊状態の試験結果とFEM解析結果を示す。試験では表層が層間はく離しCFRPが損傷破壊しており、FEM解析でも同様に層間はく離しCFRPに高い応力が生じる結果となっている。

以上よりCFRP積層材に対してCFRPの損傷破壊と層間はく離挙動をモデル化することで静的な損傷破壊挙動をFEM解析にて再現できた。

このFEM解析技術は動的な破壊現象-例えば落下衝撃問題-にも適用できる(第14図参照)。

これらFEM解析技術を設計・試作段階および実験評価段階に活用することにより、CFRPの損傷破壊状況を予測・可視化し、評価分析を推し進めることができると考えている。

接合部における強度試験技術、可視化技術、CAE技術の代表的な事例について紹介した。マルチマテリアル化への取り組みにおいては、多種多様な素材や接合方法の適応が検討されており、それらの接合部の強度評価は必須の課題である。特に強度試験では、素材の高強度化や複雑な接合部形状のために、強度把握および破壊メカニズム解明には、試験の高荷重化や破壊過程の可視化が重要な技術となる。

当社では、目的に応じて強度評価技術、材料評価技術、CAE技術、可視化技術を組合せて、総合力で課題解決の技術支援を行えるよう技術開発を進めている。

第2報では接着接合部について、実環境における経年劣化メカニズムの解明および予測技術の確立に向けた取り組みについて報告する予定である。

参考文献 *1) Linde P. et al.: ABAQUS Users' Conference 2004.