

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760650

研究課題名(和文)チタン合金を用いたハイブリッド化による複合材ボルト接合構造の比強度と信頼性の改善

研究課題名(英文)Improvement of Strength and Reliability in Composite Bolted Joint Structure by Hybridization using Titanium Foils

研究代表者

中谷 隼人(NAKATANI, Hayato)

大阪市立大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：90584417

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：航空宇宙および自動車構造への適用が進む炭素繊維複合材料(CFRP)のボルト接合部の強度と信頼性を改善するための基礎研究として、CFRPにチタン薄膜を挿入することにより成形したハイブリッド積層材料の適用を扱った。チタン薄膜によるCFRP内の損傷進展の抑制、チタンの含有割合が徐々に減少する遷移領域構造の強度、チタン薄膜とCFRPの界面破壊靱性の評価結果に基づき、ハイブリッド構造の最適化を図った。さらに、将来のスマート材料システムに向け、光ファイバセンサを用いたボルト接合部の初期損傷発生を検知も扱った。

研究成果の概要(英文)：Hybrid fibre-metal laminate that consists of titanium films and carbon fibre composite (CFRP) is introduced to achieve improvement of the strength and reliability of bolted joints in CFRP, which has been applied to aerospace and automobile structures. Hybrid structure is optimized based on investigation that deals with suppression of damage growth in CFRP by titanium films, strength in the transition region where volume fraction of titanium films gradually decreases and interfacial fracture toughness between titanium and CFRP. Detection of initial damage onset in composite bolted joints by fibre optic sensors is also discussed aiming for smart material systems.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学，複合材料・物性

キーワード：複合材料 ファイバメタル積層材 チタン CFRP ボルト接合 面圧強度 繊維微小座屈 光ファイバセンサ

1. 研究開始当初の背景

B787 や A350XWB をはじめとする航空機への適用や、自動車のモノコック構造等への応用も急速に進む炭素繊維複合材料、その中でも CFRP は、比較的大型の構造・部品の一体成形を可能にし、構造全体の部品点数の大幅な削減を実現した。しかしながら、今もお最終的な組立にはボルトやリベットといった機械的接合が多く用いられる。自動車ではエンジン・サスペンションマウントのための金属製フレームと CFRP モノコックをボルトで接合する例も多くみられる。これら機械的接合の適用は、組み立てや分解の作業効率向上等の利点があるが、CFRP はボルトによる面圧負荷に敏感であり、比較的低荷重で損傷が発生することで知られる。このため、現在は接合部周りの積層枚数を増やすことで対応しているが、積層枚数の増加による板厚の大きな変化は、重量増加だけでなく不安定な力学的挙動をもたらす。よって、単純な板厚増加に代わる新しい方法による、面圧負荷下での炭素繊維複合材料の比強度や信頼性の改善が求められている。

2. 研究の目的

(1) このような問題の解決方法のひとつとして、ファイバメタル積層材(Fibre Metal Laminates, FML)の適用が挙げられる。FML は金属と FRP を交互に積層したハイブリッド材料であり、優れた耐疲労性や損傷許容性を示すことから、これまでに民間航空機の胴体等に使用された実績もある。ここではこの FML をボルト接合部周辺に適用することを考えるが、これまでの FML は、金属材料を主とした設計の航空機に適用されたため、FRP に対して金属の体積含有率が多く、炭素繊維複合材料構造への適用は顕著な重量増加を招く。そこで、FML としての特性を維持したまま可能な限り金属の含有率を低くするため、CFRP 積層板内部にチタン薄膜を数枚挿入した FML をボルト接合部に適用する。面圧負荷による CFRP の損傷発生・進展を挿入するチタンによって抑制することで、ボルト接合挙動の改善を試みる。

(2) FML は金属層を含み CFRP よりも高密度となるため、構造全体としての重量増加を避けるためにも、FML の適用はボルト接合部付近のみとする。このため、ボルト孔から離れるにつれて CFRP とチタンのハイブリッド部から CFRP 単体へと、チタンの含有割合が徐々に減少する遷移領域を設ける必要がある。この遷移領域がボルト接合構造としての損傷発生や破壊の起点とならないよう、ここでの力学的特性を把握しておく必要がある。そこで、チタンと CFRP を用いた FML に遷移領域を導入し、そこでの構造や積層構成が、引張または曲げ負荷における強度や損傷挙動に及ぼす影響について評価する。

(3) 遷移領域を含む構造を対象とした機械的特性や損傷挙動の評価においては、CFRP 内の損傷だけでなく、とりわけチタンと CFRP の界面はく離が興味の対象となる。これはチタン-CFRP 界面の破壊靱性が CFRP の層間破壊靱性よりも低くなる可能性があるため、これにより引張強度が左右されるためである。また、この界面破壊靱性はチタンと CFRP の母材であるエポキシ樹脂の界面における値ではあるが、CFRP 内の炭素繊維の配向角にも依存することが考えられる。そこで、チタンに隣接する CFRP の繊維配向角が異なる場合の界面破壊靱性を 3 点曲げ試験により取得する。さらに、得られた結果をもとに、前節で評価した遷移領域を有する構造の強度や損傷挙動について考察する。

(4) CFRP 積層板ボルト接合部の面圧破壊においては、炭素繊維の微小座屈の発生が大きく影響することがこれまでに明らかとなっている。本研究では CFRP にチタンを挿入した FML を研究対象とするが、繊維微小座屈が初期損傷として発生することには変わりはないと考えられる。そこで光ファイバセンサの一種である FBG センサを用い、炭素繊維微小座屈発生の検知を目指す。(1) 節での実験結果をもとに FBG センサの埋め込み位置を決定し、面圧負荷中の FBG センサからの出力変化から損傷発生を判断する。これより、これまで提案されている他の手法よりも早い段階での初期損傷を検知できることを示す。

3. 研究の方法

(1) ボルト接合による面圧負荷における強度と損傷挙動の評価では、CFRP 積層板単体と CFRP とチタン薄膜を積層した FML である Ti/CFRP 積層板を用いた。CFRP には Carbon/Epoxy プリプレグ(T700SC/2592, 東レ)、チタン薄膜は第 1 種純チタン(厚さ 50 μ m, 新日鉄住金)を使用した。CFRP 試験片の積層構成は[45/0/-45/90]_{2S} の擬似等方積層とし、Ti/CFRP 積層板はこの CFRP 積層板に数枚のチタン薄膜を挿入し、その挿入位置によって積層構成の異なる 4 種類の試験片を作製した。チタン薄膜をなるべく均等に積層した Type A, 外側の 0°層を挟んだ Type B, 内側の 0°層を挟んだ Type C, 全ての 0°層を挟んだ Type D の 4 種類の試験片を用いた(表 1)。FML 試験片はプリプレグとチタン薄膜を積層したものをオートクレーブにより成形した。チタン薄膜は積層前に過酸化水素水(濃度 30%, 昭和化学)に 1 時間浸すことによる表面処理を施すことで、エポキシ樹脂との接着性を向上させた。ボルト直径および円孔の直径はともに 6.0mm とした。ナットおよびワッシャーとともにトルクレンチを使用し、締め付けトルクを 20Nm として締結した(図 1)。

ボルト接合状態による面圧負荷試験には、テンシロン万能試験機(RTF-1350, (株)A&D 製)を用いた。両端から 40mm をチャックに挟

んで固定し、室温条件下でクロスヘッド変位速度1.0mm/minでボルトによる面圧を荷重し、試験片が破断するまでの荷重と変位を測定した。引張試験後の試験片の断面を研磨し、各試験片の積層板内部の損傷挙動をデジタルマイクロスコプ(VHX-1000, KEYENCE)により観察した。

(2) 遷移領域を有するTi/CFRP積層板の引張および曲げ荷重における強度と損傷挙動の評価には、前節と同様の積層構成(表1, Type A, B, C)を適用した。ここで評価対象とした4種類の遷移領域を図2に示す。また、遷移領域を持たない試験片としてCFRP単体のものと試験片全体にチタン薄膜が挿入されたPattern 0も用いた。以下では、試験片の表記方法として例えば積層構成がType A, 遷移領域がPattern1の場合、FML-A-1と表記する。試験片寸法は長さ180mm, 幅10mmとした。

引張試験は前節と同じ試験機を用いクロスヘッド速度は1mm/minとした。各遷移領域パターンとも3本ずつ試験片が破断するまで引張を荷重した。また、デジタルマイクロスコプで観察を行いながら引張試験を行い、遷移領域構造や積層構成による損傷挙動の

表1 Ti/CFRP積層板の積層構成と面密度

試験片	積層構成	面密度 [g/cm ²]
CFRP	[45/0/-45/90] _{2S}	0.35
FML type A	[45/0/-45/Ti/90/45/0/Ti/-45/90/Ti/90/-45/Ti/0/45/90/Ti/-45/0/45]	0.46
FML type B	[45/Ti/0/Ti/-45/90/45/0/-45/90/Ti/90/-45/0/45/90/-45/Ti/0/Ti/45]	
FML type C	[45/0/-45/90/45/Ti/0/Ti/-45/90/Ti/90/-45/Ti/0/Ti/45/90/45/0/45]	
FML type D	[45/Ti/0/Ti/-45/90] _{2S}	0.52

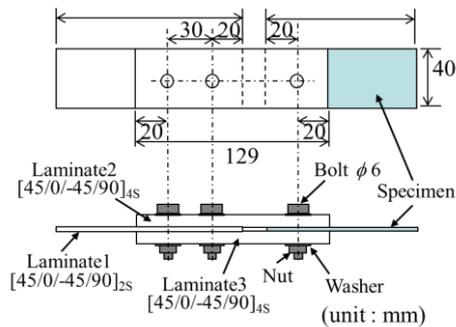


図1 ボルト接合による面圧負荷のための試験片形状

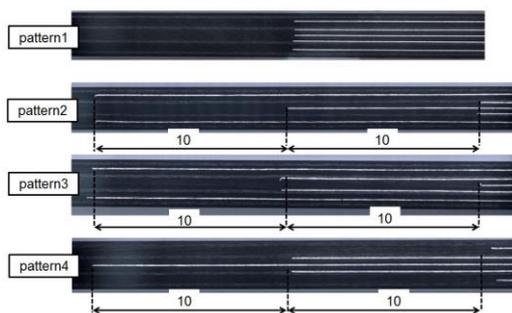


図2 遷移領域構造

違いを比較した。4点曲げ試験は万能試験機(SC-5H, (株)JT トーシ)を用い、クロスヘッド速度は3mm/minとした。4点曲げ試験の支点間距離と圧子間距離はそれぞれ100mmと40mmとし、遷移領域が圧子間の中央にくるように試験片を設置した。試験本数は各試験片3本とした。

(3) Ti/CFRPの界面破壊靱性値の方向依存性の評価には、0/Ti試験片:[0₅/Ti/0₅/Ti/0₅]および、90/Ti試験片:[90₅/Ti/0₅/Ti/90₅]を用いた。曲げ荷重における引張側の中央に予き裂を導入した。3点曲げ試験は万能試験機(SC-5H, (株)JT トーシ)を使用し、き裂長さが10mm進展するたびに除荷、再荷重を行った。荷重速度および除荷速度は、それぞれ0.5mm/min, 1.5mm/minとした。支点間距離は100mmとし、き裂進展長さは読み取り顕微鏡で測定した。図3に試験片と3点曲げ試験の模式図を示す。負荷・除荷毎に荷重-変位曲線が囲む面積とき裂進展長さをを用い、各試験片における界面破壊靱性値をもとめた。

(4) 光ファイバセンサによる炭素繊維複合材ボルト接合部の損傷発生検知には、擬似等方CFRP積層板を評価対象とした。ボルト接合状態における面圧負荷での初期損傷である炭素繊維微小座屈の発生を検知するため、0°層付近に光ファイバセンサの一種であるFBGセンサを埋め込むこととした。また擬似等方性CFRP積層板に含まれている4層の0°層のうち、外側よりも内側の0°層における微小座屈が早く発生する傾向にあるため、内側の0°層と-45°層の層間にFBGセンサを埋め込んだ。今回使用したFBGセンサはグレーティング長さが35mmであるため、ボルト孔端から試験片端部までの17mmの領域全てがFBGによる評価対象となっている。FBGセンサを埋め込んだ試験片の模式図を図4に示す。これに(1)節と同様にボルト接合による面圧を

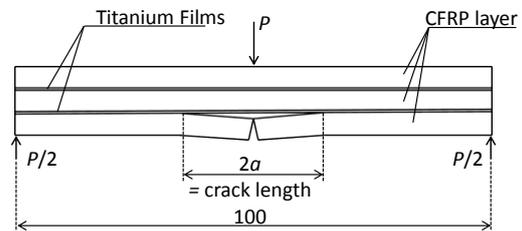


図3 界面破壊靱性評価のための3点曲げ試験の概略図

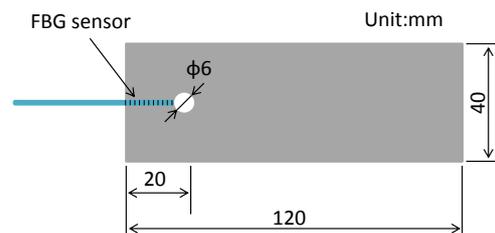


図4 面圧負荷のためのFBGセンサ埋め込みCFRP試験片

負荷した。FBG センサには SLD 光源 (SLD-1550-13, FiberLabs Inc.) から光カプラを經由して光を入射し, FBG からの反射光の波長成分を光スペクトラムアナライザ (MS9710B, アンリツ(株)) で測定した。

4. 研究成果

(1) 図 5 にボルト接合状態における各試験片の荷重-変位曲線を示す。ここでは, 荷重-変位曲線における荷重低下点に注目し, その時の積層板内部の損傷状態を観察した。図より, CFRP 積層板では, 約 4500N で最初の荷重低下が, その後約 10700N で 2 回目の荷重低下がみられた。Ti/CFRP 積層板においても荷重低下点に注目し, その時の積層板内部の損傷状態を比較した。各試験片の荷重低下点を表 2 に示す。表では, 各試験片で荷重低下がみられた瞬間の荷重値, およびこれを各試験片の面密度で正規化したものを示している。最初の荷重低下点において Ti/CFRP 積層板 Type C が他の試験片に比べると大きな値を示したことがわかる。

CFRP 積層板の面圧負荷による積層板内部の損傷状態を, 面圧負荷部の断面から見た写真を図 6 に示す。CFRP 積層板の面圧負荷による特徴的な損傷として, 0°層の炭素繊維の微小座屈が観察された。また 0°層に隣接する層には, 繊維微小座屈によって誘発したせん断破壊が発生しており, 面圧負荷による強度低下の主な原因は繊維微小座屈の発生であることがわかる。このことから 0°層の微小座屈とこれに起因する隣接層の破壊を抑えることができれば, 試験片全体の損傷進展を抑制できると考えられる。

図 7 に Ti/CFRP 積層板 Type A の断面写真を示す。0°層に隣接するよう挿入したチタン薄膜が, 0°層の繊維微小座屈により引き起こさ

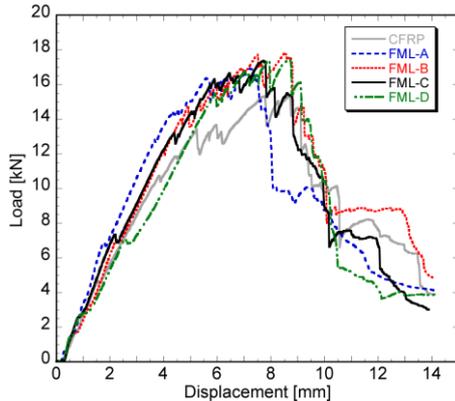


図 5 面圧負荷における荷重-ボルト変位曲線

表 2 荷重-変位曲線における荷重低下点

試験片	第 1 荷重低下点		第 2 荷重低下点	
	[kN]	[kNcm ² /g]	[kN]	[kNcm ² /g]
CFRP	4.67	13.3	10.7	30.6
FML type A	6.87	14.9	12.8	27.8
FML type B	7.09	15.4	12.2	26.5
FML type C	7.37	16	13.2	28.7
FML type D	7.09	13.6	15.5	29.8

れていた隣接 CFRP 層への損傷進展を抑制していることが観察された。この結果に基づき, 他の Ti/CFRP 積層板においては, 0°層にチタン薄膜が隣接するような積層構成とした。図 8 は荷重 10kN における各 Ti/CFRP 積層板の内部損傷を比較したものである。CFRP 試験片と比較して, Ti/CFRP 積層板の方が積層板全体の損傷進展が抑制されている。また, 外側の 0°層をチタンで挟んだ試験片 (Type B) では, 内側の 0°層の繊維微小座屈に起因する損傷が進展していることに対し, 内側の 0°層をチタンで挟んだ試験片 (Type C) では, 他の試験片に比べて損傷進展が少ないことがわかる。全ての 0°層をチタンで挟んだ試験片 (Type D) でも, 繊維微小座屈による損傷が抑制されているが, より高い面圧負荷においてチタン自身の座屈が損傷を複雑化したこと, また材料としての密度が高くなることから, 最適な積層構成であるとはみなせない。以上のことから, 複合材ボルト接合部における強度や信頼性の改善は, 積層内側の 0°方向の炭素繊維をチタンで挟み込み, 繊維微小座屈の発生とこれによる隣接層への損傷進展を抑制することにより実現されることが明らかとなった。

(2) 図 9 に遷移領域を有する Ti/CFRP 積層板の引張強度および曲げ強度を示す。引張強

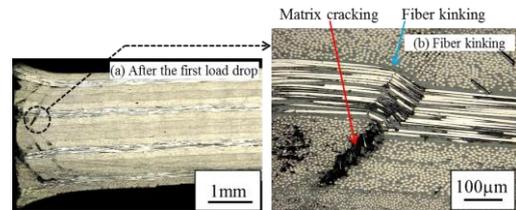


図 6 面圧負荷による CFRP 積層板の初期損傷

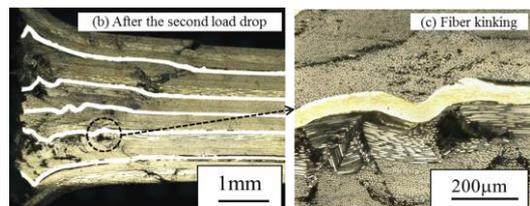


図 7 チタン薄膜による損傷進展の抑制

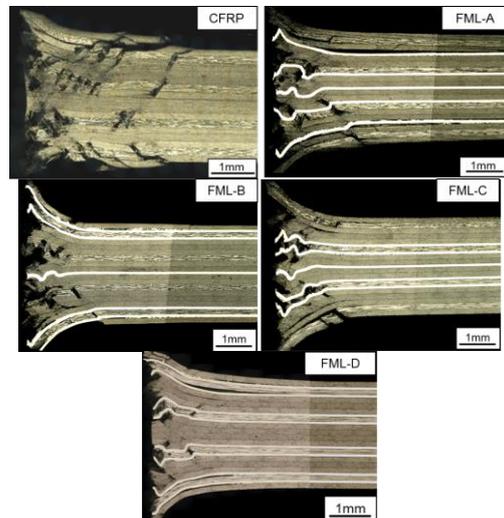


図 8 各 Ti/CFRP 積層板の面圧損傷(10kN)

度については、FML-A のみ遷移領域構造の違いによる影響があり、FML-A-2 が最も高い強度を示した。FML-B、FML-C では遷移領域構造の影響は明確ではないが、FML-A よりも全体的に高い引張強度を示した。これは FML-A では Ti/90°界面が多く、そこでの界面はく離が発生したためである (図 10)。このはく離はチタン薄膜を 0°層と隣接させることで抑制されていることもわかった。図 11 にすべての遷移領域構造で観察された典型的な初期損傷の様子を示す。初期の損傷としては積層中央部に挿入されたチタン薄膜先端部から 90°層内にき裂が発生する。それとほぼ同時にチタン薄膜と 90°層間のはく離や 90°層内を荷重方向に進展するき裂が発生する。FML-A においては、これら損傷は積層中央部だけではなく、他の 90°と隣接するチタン薄膜先端部からも発生した。これも FML-A が他と比較して低強度を示す原因のひとつであると考えられる。曲げ試験においては FML-B が最も低い強度を示した。これは FML-B では最外層付近に挿入されているチタン薄膜の先端が起点となり座屈が生じやすくなったためであることが観察された。

これらの結果より、FML-C-2 が引張強度と曲げ強度どちらもバランス良く高い値を示すことが明らかとなった。これは、積層内側の 0°方向の炭素繊維をチタンで挟み込む積層構成(FML-C)とし、チタンの先端を互い違いとなるように遷移領域を設けることにより、面圧負荷における優れた特性と引張・曲げ強度の両立が可能であることを示し、興味深い結果である。

(3) Ti/CFRP 界面破壊靱性の評価のための 0/Ti および 90/Ti 試験片の荷重-変位曲線を図 12 に示す。また、90/Ti 試験片における予き裂からの損傷進展を図 13 に示す。図中の 1 で示す予き裂のため、図中 2 から左右方向にチタンと CFRP の間にき裂 (界面はく離) が進展する。この初期はく離進展は、図 12 の矢印 1 で示す荷重 80N 付近で発生した。このため、試験初期では荷重と変位が線形的であったのに対し、80N 付近に達すると傾きが変わる。0/Ti 試験片についても同様である (図 12 の矢印 2)。

これら荷重-変位曲線と界面におけるき裂長さから、破壊靱性を算出した結果を図 14 に示す。図より、0/Ti 界面の破壊靱性値が 90/Ti 界面のものより高い値を示すことが示

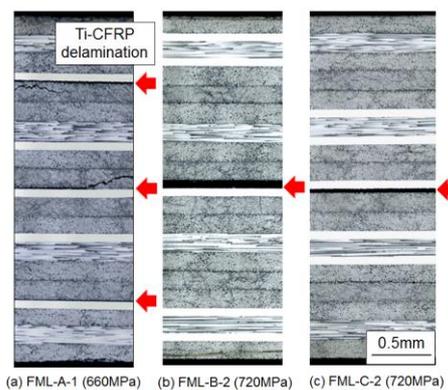


図 10 Ti-90°層の界面はく離

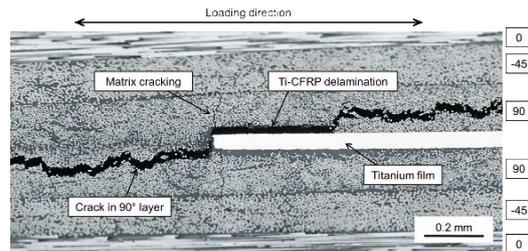


図 11 チタン薄膜先端付近の損傷 (FML-C-2, 730MPa)

された。また、どちらの界面ともき裂が進展するにつれて破壊靱性が低下したが、これはき裂進展にともない破壊モード (モード I と II) の割合が変化したためであると考えられる。この結果より、Ti/CFRP の界面破壊靱性には方向依存性があり、これによって前節の引張負荷においては、破壊靱性値の低い 90/Ti 界面がはく離することにより、引張強度の低下につながる事が説明できる。

(4) FBG センサを埋め込んだ CFRP 積層板の面圧荷重-変位線図を図 15 に示す。前節までの結果では、CFRP 積層板のボルト接合における面圧負荷では、荷重約 5kN での小さな荷重低下の前後で、炭素繊維の微小座屈が発生した。本節の実験 (図 15) においては、これと同様の明確な荷重低下はみられなかったが、荷重 6.3kN-変位 1.1mm 前後での微妙な変化が、これに相当すると考えられる。そこでボルト変位 1.0mm 前後に注目し、そこでの FBG センサからの反射光のスペクトル変化を評価した。これを図 16 に示す。図では示していないが、試験前は単一のピークを有するスペクトルを示した。図 16(a)に示すように、0.85mm, 0.95mm, 1.05mm のボルト変位

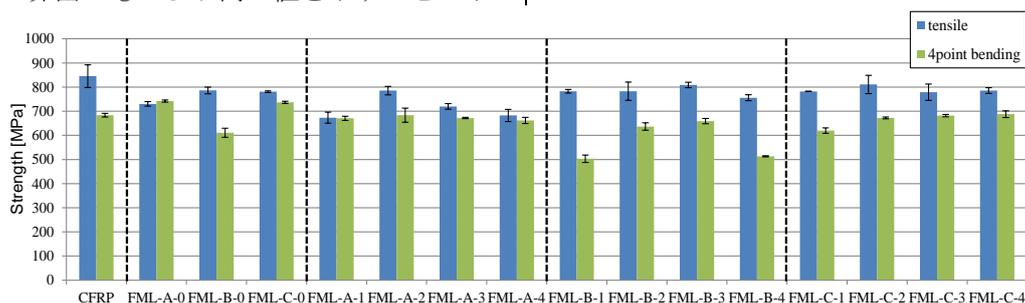


図 9 各遷移領域構造を有する Ti/CFRP 積層板の引張強度および曲げ強度

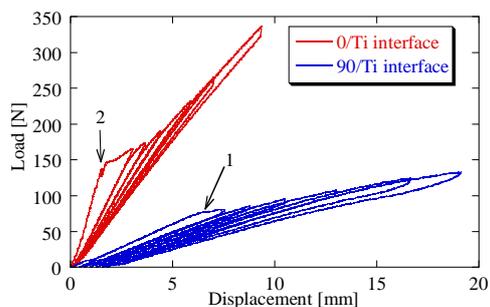


図 12 荷重-変位曲線(界面破壊靱性評価)

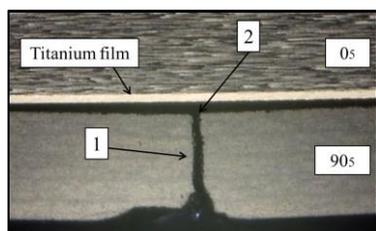


図 13 予き裂から進展する界面はく離

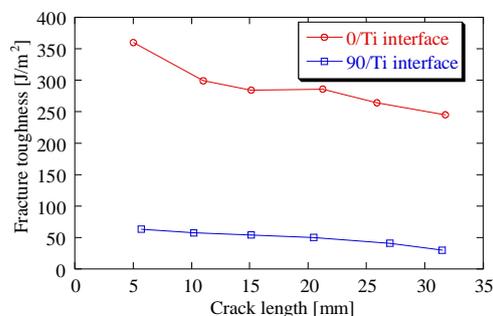


図 14 0°/Ti および 90°/Ti 界面の破壊靱性値

では、低波長側にシフトしながら幅広いスペクトルを示すように変化することがわかる。その後、ボルト変位 1.15mm ではスペクトルはほぼ平坦になるが、1.25mm, 1.35mm とボルト変位が増すことで、波長 1554.4nm 付近で低強度ながら再度ピークを示した(図 16 (b))。このように、ボルト変位の増加による、反射光スペクトルのピークの低波長側へのシフトおよび平坦化、その後のピークの再形成は、CFRP 積層板内での損傷発生に関係するものであると考えられる。これより、繊維微小座屈の発生が確認された荷重レベルにおいて、FBG 反射光のスペクトル変化がみられたことから、FBG センサを埋め込むことで CFRP 積層板のボルト接合における初期損傷である繊維微小座屈の発生を検知できることが示唆された。これと同様の考察は Ti/CFRP 積層板にも適用できると考えられる。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 19 件)

- ① 中谷隼人, 辰田学, 逢坂勝彦, "光ファイバセンサによる CFRP 積層板ボルト接合部の損傷検知," 第 5 回日本複合材料会議, Mar.5.2014, キャンパスプラザ京都.
- ② 光宗大貴, 猫島悠平, 中谷隼人, 荻原慎二, "CFRP/チタン薄膜ハイブリッド積層板の

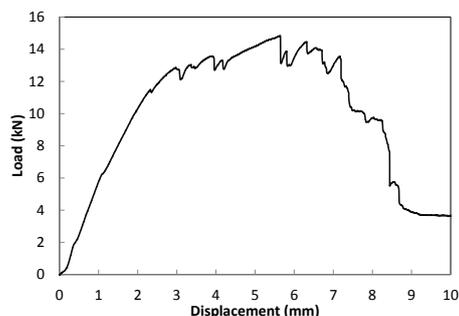


図 15 CFRP 積層板の面圧荷重-変位線図

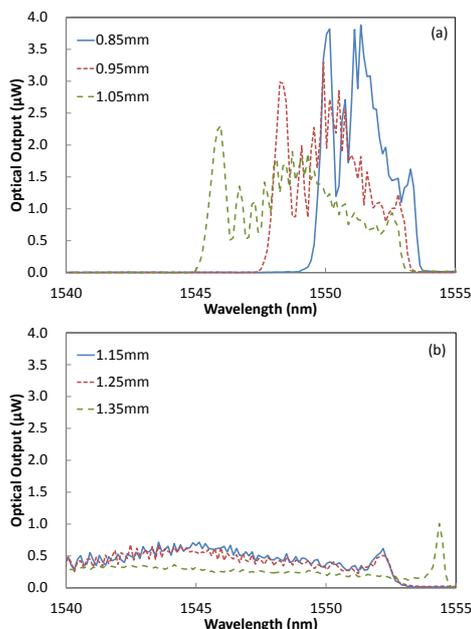


図 16 面圧負荷中の反射光スペクトル変化

引張強度に及ぼす界面破壊靱性の方向依存性の影響," 日本機械学会第 21 回機械材料・材料加工技術講演会, Nov.10.2013, 首都大学東京.

- ③ Y.Nekoshima, D.Mitsumune, H.Nakatani and S.Ogihara, "Mechanical Behavior of Thin Titanium Films / CFRP Hybrid Laminates containing Transition Region," The 19th International Conference on Composite Materials, Aug.1.2013, Montréal, Canada.
- ④ 中谷隼人, 山田智己, 荻原慎二, "チタン薄膜/CFRP ファイバメタル積層材ボルト接合部の損傷評価," 第 37 回複合材料シンポジウム, Oct.19.2012, 名古屋市中小企業振興会館.
- ⑤ H.Nakatani, T.Yamada, Y.Nekoshima and S.Ogihara, "Damage Behavior in Hybrid Thin-Titanium Film Composite Laminates for Bolted Joints," The 15th U.S.-Japan Conference on Composites Materials, Oct.1.2012, Arlington, TX, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中谷 隼人 (NAKATANI, Hayato)

大阪市立大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号：90584417