

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06953

研究課題名（和文）軽量宇宙機用極低温複合材タンクのためのリークバリア層の開発と極低温試験実証

研究課題名（英文）Development of leak barrier layer and cryogenic test demonstration for cryogenic composite tanks of lightweight spacecrafts

研究代表者

熊澤 寿（Kumazawa, Hisashi）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員

研究者番号：20344252

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、極低温推進剤複合材製タンクの漏洩対策のため、樹脂割れに強い複合材薄層を活用したリークバリア層の有効性を解析的および実験的に評価した。材料の弾性率と熱膨張率の温度依存性も考慮した有限要素法を用いて、リークバリア層がある場合とない場合の積層板において樹脂割れがすべての層で発生する条件を計算し、リークバリア層が加わることで積層板の耐漏洩性が高くなることが分かった。常温や極低温において積層板試験片に複数回二軸負荷を加えた後にガス漏洩特性を測定し、常温だけでなく極低温においてもリークバリア層があることにより、複合材料の耐漏洩性が向上することが実験的に実証できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

薄層を用いたリークバリア層については、複合材製タンクの漏洩を抑えるものと考えられ、一部の複合材製タンクに適用されたが、耐漏洩特性について定量的な評価が行われていなかった。本研究において、薄層を用いたリークバリア層の漏洩特性が解析的及び実験的に定量的に評価できたことは学術的にも意義がある。また、これらのリークバリア層の有効性が確認され、再使用ロケットの極低温複合材タンクだけでなく、液体水素を燃料とする極超音速機の燃料タンクや人工衛星等のタンクにも軽量の複合材製タンク適用の可能性が広がったことは、将来の社会に対して意義のある結果である。

研究成果の概要（英文）：The numerical and experimental evaluation of leak barrier layer composed of durable thin plies for the prevention of cryogenic propellant leakage through the composite tank walls is studied. Finite element analysis including temperature dependency of material constants was conducted to calculate leak path formation with matrix cracks in all layers of composite laminates with and without the leak barrier layer. Gas leakage property of the composite laminate specimens was measured after the application of several biaxial tensile loads to the specimens at room and cryogenic temperature. Numerical results reveal that the composite laminates with leak barrier layer have high leakage resistance since the thin plies remain undamaged even at higher stress. The good leakage resistance property of the specimens with leak barrier layer was also experimentally demonstrated at room temperature and cryogenic temperature.

研究分野：構造・材料

キーワード：構造・材料 複合材料 極低温推進剤タンク マトリックスクラック 推進剤漏えい

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙への輸送のコストを大幅に削減するために、再使用型ロケットの開発が期待され、1990年代には各国でそのための基礎技術のための研究が盛んに行われていた。再使用型ロケットのキーとなる技術の一つが、機体の大幅な軽量化を実現する CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)製極低温複合材タンクである。

米国では1990年代、NASAが再使用型宇宙往還機の無人実験機 X-33 の開発を進めており、X-33 用大型極低温複合材タンクを開発していたが、液体水素を使用した構造試験時にタンクの破壊が発生した。このタンク破壊の原因調査の結果、積層板に発生した樹脂割れが原因であり、タンク構造において強度だけでなく、樹脂割れに伴う推進剤の漏洩特性も重要であることが明らかとなった。

再使用型宇宙往還機の推進剤タンクの軽量化に関連し、複合材料の樹脂割れについて、研究が行われてきた。複合材料の損傷解析モデルは、多くの研究者が提案しており、極低温での損傷に関しては、材料特性値の温度依存性も考慮された計算が行われた。その結果、極低温中では複合材中に樹脂割れが比較的低い応力レベルで発生することが解析的に予測され、極低温試験においても複合材中の樹脂割れが低い荷重で発生することが観察された。

このような低い応力レベルでの樹脂割れの発生が及ぼす悪影響として、タンク内の推進剤である液体水素の漏洩の発生が考えられ、常温ではあるものの積層板中の樹脂割れ密度と漏洩量の定量的な関係が実験および解析により明らかとなった。さらに、積層板の積層構成が与える影響も実験的に明らかになってきた。また、漏洩量のより詳細な解析方法として、数値流体力学的な計算を取り入れて、樹脂割れと漏洩量の定量的な関係の評価も可能となってきた。これらのガス漏洩に関する知見を取り入れた漏洩対策なども、これまで国内外の研究開発者よりいくつか提案されていたが、それらの提案の定量的な確認を、実験で行うことができず、漏洩対策の定量的な効果の実証ができないことが課題として残されていた。

2. 研究の目的

通常のプリプレグより、厚さが半分以下の薄いプリプレグを用いた薄層の積層板は、樹脂割れが起きにくく、耐漏洩性に効果的であると考えられる。しかし、全ての層を薄いプリプレグで製作するには工程数が多くなり、製造コストの上昇が問題であった。積層板の大部分を通常層厚のプリプレグで構成し、部分的に薄層のプリプレグを含ませた積層板を製造し、複合材料の衝撃後圧縮強度の向上と製造コストの低減の試みも行われ、衝撃後の投影剥離面積の減少などの効果が明らかとなった。しかし、薄層を部分的に含んだ積層板の耐漏洩性については、まだ十分に明らかとはならない。

本研究では、極低温推進剤タンクの複合材料化に効率的なリークバリア層を活用できることを示すことを目的とし、複合材薄層を活用したリークバリア層の耐漏洩特性の有効性を解析的に確認し、リークバリア層を含んだ積層板の対漏洩特性の実証試験を行った。極低温における複合材料の力学挙動で重要である損傷に対して、損傷解析モデルの構築を行い、複合材薄層で構成されたリークバリア層の耐漏洩特性の有効性の確認を行う。低温環境における複合材料一方向材の弾性率、ポアソン比、熱膨張率を測定し、損傷解析モデルの構築において材料定数の温度依存性を考慮した。また、常温及び極低温環境において十字型試験片へ二軸負荷を加え、常温と極低温環境での損傷の発生と、それに伴う漏洩量の確認を行った。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、以下の4項目に沿って実施する。

(1) 極低温材料特性の測定

複合材料の基礎材料特性である一方向材の弾性率、ポアソン比、熱収縮の温度依存性を測定する。複合材料の繊維方向と繊維に直角方向の弾性率と熱収縮には大きな差があり、温度による変化も顕著である。温度依存性を考慮した極低温損傷解析モデルを作成するために、測定した弾性率と熱収縮の温度依存性を解析モデルに適用する。本研究で用いた積層板は、東レ製炭素繊維強化エポキシ樹脂 T700SC/#2500 の薄層プリプレグ材 (公称層厚 0.06 mm) を用いて製作した。

(2) 損傷解析モデルの構築

測定された複合材料の弾性率と熱収縮の温度依存性を適用し、商用有限要素法解析ソフトウェア MSC Marc2013 を用いて、損傷解析モデルの構築を行った。有限要素法において層内き裂および層間剥離を模擬するために、結合力モデル (Cohesive Zone Model, CZM) を採用した。結合力モデルは有限要素法解析ソフトウェアに実装されている混合モード型の結合力要素を用いた。

モデル化する積層板の積層構成は、実験でも用いるリークバリア層の無い $[0_4/90_4]_{2S}$ とリークバリア層のある $[0_4/90_4/0_4/90_4/0/90]_S$ とした。

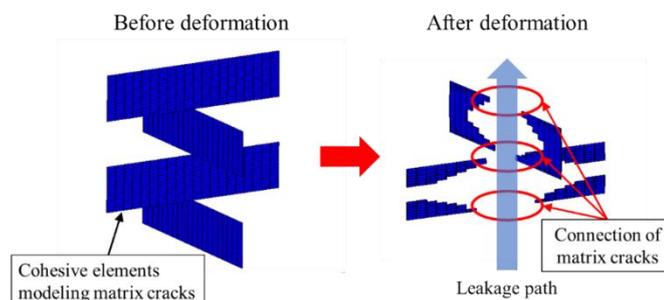


図1. 樹脂割れによるリークパスの形成.

(3) 複合材薄層を含リークバリア層の有効性の解析的評価

リークバリア層の中でひとつの層でも樹脂割れが発生しなければ、漏洩が発生しないこととして、漏洩経路の初期発生を計算した。樹脂割れによる貫通したリークパスの形成を常温/極低温環境と二軸荷重が加わる場合について解析的に計算し、リークバリア層がある場合とない場合の積層板の耐漏洩性を評価した。すべての層に樹脂割れが発生し、リークパスが形成される概要図を図1に示す。

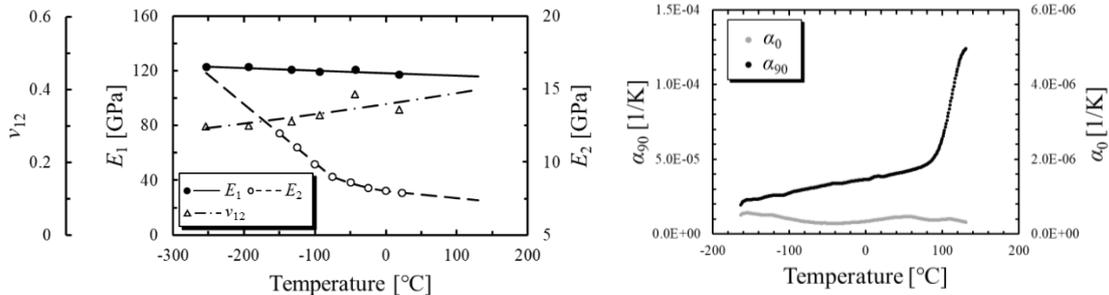
(4) 複合材薄層を含むリークバリア層の有効性の実験的実証

薄層3層から構成されるリークバリア層を含んだ積層板の二軸荷重試験/漏洩試験を実施するため、十字型の試験片を製作し、比較用としてリークバリア層がない積層板試験片の製作も行った。これらの試験片を用いて、常温及び極低温での二軸荷重試験、その後の漏洩試験を実施し、耐漏洩性が向上することを実験的に実証する。また、解析による初期漏洩発生荷重の予測精度についても検証する。

4. 研究成果

(1) CFRP 材料特性の温度依存性

一方向材 CFRP の弾性率およびポアソン比の測定を-253°Cから 20°Cの範囲で行った。試験片は 0 度方向材と 90 度方向材を用いて行った。測定した弾性定数の結果と測定結果に基づいた近似曲線を図2(a)に示す。図2(a)において、1は繊維方向、2は繊維に直交方向を表す。また、熱膨張率測定装置を用いて、-170°Cから 130°Cの範囲で 0 度および 90 度方向の一方向材の熱膨張率を測定した。測定した熱膨張率を図2(b)に示す。図2の測定した材料定数に加え、表1のように設定した材料定数も有限要素法解析に適用し、積層板の損傷解析を行った。



(a) 弾性定数

(b) 熱膨張率

図2. 一方向材 CFRP (T700SC/2500) の材料定数.

表1. 一方向材 CFRP (T700SC/2500) のせん断弾性率と界面特性.

Laminate properties		
In-plane shear modulus G_{12}	4.8 GPa	
Out-of-plane shear modulus G_{23}	3.2 GPa	
Out-of-plane shear modulus G_{31}	4.8 GPa	
Out-of-plane Poisson's ratio ν_{23}	0.49	
Interface properties		
Mode I maximum traction t_{IC}	20°C	-253°C
Mode II and III maximum traction t_{IIC}	60MPa	70MPa
Mode II and III maximum traction t_{IIIC}	90MPa	105MPa
Mode I critical energy release rate G_{IC}	50N/m	250N/m
Mode II and III critical energy release rate G_{IIC} and G_{IIIC}	200N/m	1000N/m

(2) 損傷解析モデル

初期段階では樹脂割れの間隔を 1mm と仮定して結合要素を積層板モデルに設定し、常温と極低温で樹脂割れや層間剥離の発生応力について計算を行った。また、常温や極低温において二軸荷重試験を行い、実験的に得られた樹脂割れ間隔をモデルに適用し、より精度の高い初期漏洩発生の解析的評価を行った。実験的に得られた樹脂割れ間隔を適用した場合の $[0_4/90_4]_{2S}$ (リークバリア層の無し) と $[0_4/90_4/0_4/90_4/0/90]_S$ (リークバリア層の有り) のモデルを図3に示す。

(3) リークバリア層の有効性解析の結果

樹脂割れによるリークバリア層内を貫通したリークパスの形成を極低温環境と二軸荷重が加わる場合について解析的に評価した。負荷については、十字型二軸試験の負荷条件に合わせるため、0 度方向ひずみ (ϵ_x) と 90 度方向ひずみ (ϵ_y) の比率を 1:2、2:1 と交互に負荷しつつ、ひずみレベルを上げていく条件で行った。解析の結果、3 層の薄層で構成されるリークバリア層が加わることで積層板の耐漏洩性が高くなることが分かった。図3のモデルを用いて計算した結果を図4に示す。低温においては、温度低下による熱応力の発生により、樹脂割れの発生する応

力が低くなり、低いひずみレベルでリークパスが形成される。リークバリア層がある場合は、薄い 0° 層の樹脂割れが発生しにくいいため、リークパスが形成されるひずみレベルは高くなった。

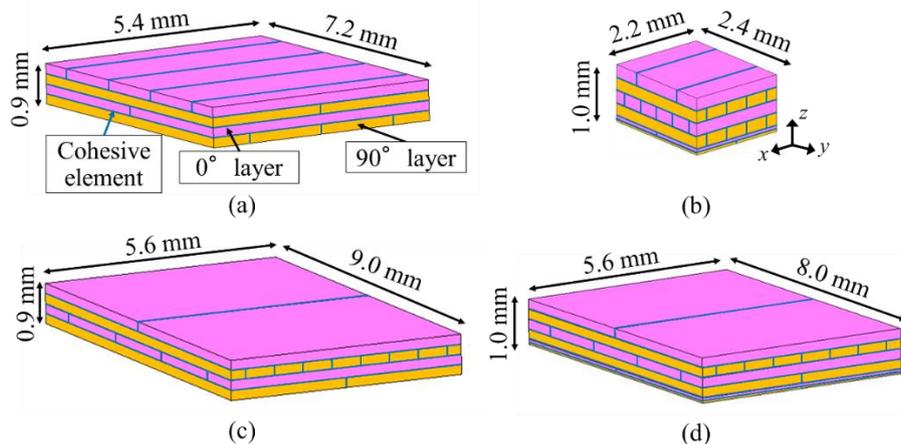


図3. 有限要素解析モデル. (a) $[0_4/90_4]_{2S}$, 20°C . (b) $[0_4/90_4/0_4/90_4/0/90]_S$, 20°C .
(c) $[0_4/90_4]_{2S}$, -253°C . (d) $[0_4/90_4/0_4/90_4/0/90]_S$, -253°C .

(4) リークバリア層の有効性の実証結果

リークバリア層を含んだ積層板の二軸負荷試験/漏洩試験を実施するため、十字型の試験片(図5)を製作し、比較用としてリークバリア層がない積層板試験片の製作も行った。これらの試験片を用いて、常温及び極低温で二軸負荷試験/漏洩試験を実施した。極低温における二軸負荷においては、図6に示すような冷却プレートを十字型試験片中央部に接触させ、試験片評価部を極低温に冷却した。

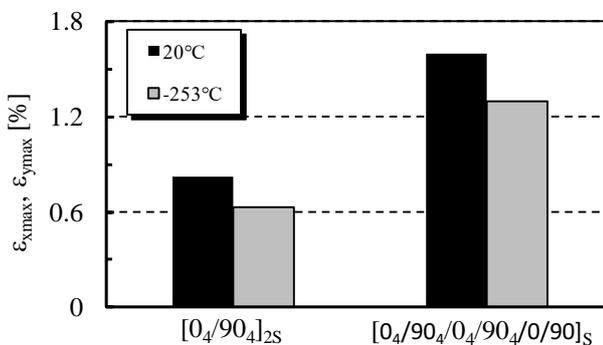


図4. 常温と極低温におけるリークパス形成時の最大負荷ひずみ解析結果.

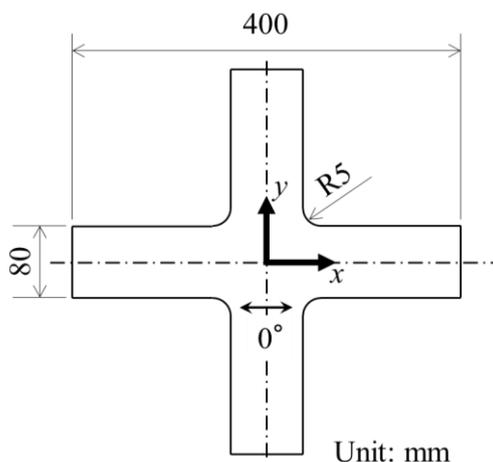


図5. 十字型試験片(厚さ約2mm).

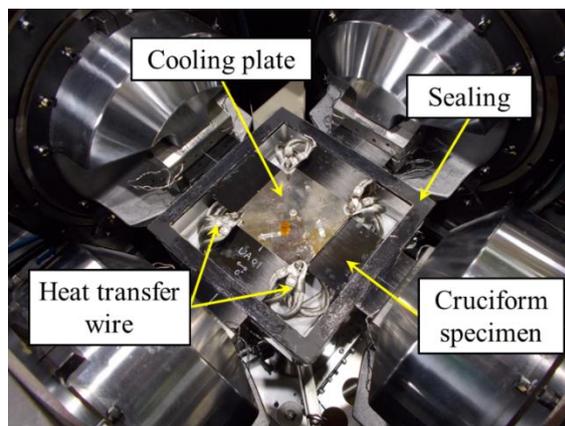


図6. 極低温二軸試験セットアップ.

二軸試験片に対して、 0 度方向ひずみ(ϵ_x)と 90 度方向ひずみ(ϵ_y)の比率が $1:2$ 、 $2:1$ となるような二軸荷重を交互に負荷し、除荷後にガス漏洩量の測定を行った。ガス漏洩量の測定に用いた検知ガスはヘリウムガスであり、漏洩量の測定領域は試験片中央部の $45\text{mm} \times 45\text{mm}$ である。常温において $[0_4/90_4]_{2S}$ 試験片に負荷したひずみサイクル例を図7に示す。

$[0_4/90_4]_{2S}$ 試験片(リークバリア層の無し)と $[0_4/90_4/0_4/90_4/0/90]_S$ 試験片(リークバリア層の有りの)の常温における最大負荷ひずみと漏洩量の関係を図8に示す。漏洩量は、単位面積を単位時間通り抜ける標準状態のガス体積として換算した。図8よりリークバリア層のある試験片は、ない試験片に比べてリークの初期発生ひずみも高く、同じレベルのひずみを負荷しても非常に漏洩量が少なくなることが確認できた。

同様の試験を極低温環境においても実施した。 $[0_4/90_4]_{2S}$ 試験片(リークバリア層の無し)と $[0_4/90_4/0_4/90_4/0/90]_S$ 試験片(リークバリア層の有りの)の極低温環境における最大負荷ひずみと漏洩量の関係を図9に示す。ガス漏洩の初期発生は、どちらの試験片も0.6%の最大ひずみ発生時に発生したが、同じレベルの最大負荷ひずみで比較すると、リークバリア層がある試験片は常温と同様に顕著に低い漏洩量となっていることが分かる。図8および図9より、常温だけでなく、極低温においてもリークバリア層があることにより、漏洩量を低く抑えることが実験的に実証できた。

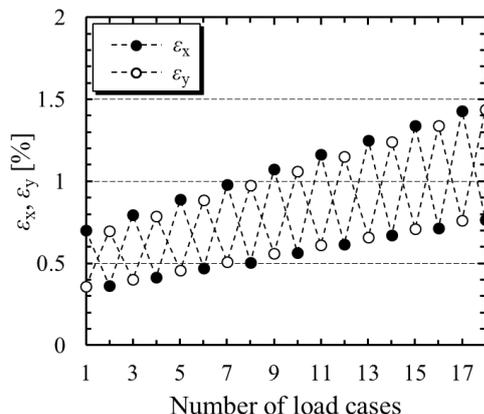


図7. 常温におけるサイクル負荷による発生ひずみ($[0_4/90_4]_{2S}$ 試験片).

(5) ガス漏洩の初期発生解析と実験結果の比較

図10と図11に、それぞれ常温と極低温における漏洩の初期発生の最大ひずみについての解析と実験の比較を示す。リークバリア層がない場合は、実験と解析の漏洩の初期発生ひずみがよく一致している。しかし、リークバリア層がある場合、常温での極低温で漏洩の初期発生ひずみが、解析結果では顕著に大きくなるが、実験ではそれほど漏洩の初期発生ひずみが高くないことが分かる。

損傷モデルを用いた漏洩の初期発生ひずみの予測については、リークバリア層がない積層板の初期漏洩発生ひずみの予測は精度よくできることが分かった。リークバリア層がある積層板の初期漏洩発生ひずみについては定量的な予測はむづかしかつたが、ある程度の定性的な予測は可能であった。この定量的な予測の難しさについては、薄層を含むリークバリア層の破壊メカニズムに対して、層厚のばらつきの影響が薄い層厚ため大きく出るなど、通常層厚より力学的に複雑な部分があったためと考えられる。薄層を含む積層板の解析についてのより詳細な検討を今後進める必要があることが分かった。

実験結果より、リークバリア層がある場合は、漏洩が発生したとしても、リークバリア層がない場合に比べて、非常に低い漏洩量となることが実験的に明らかになった。リークバリア層がある場合、すべての層に樹脂割れが発生しても漏洩量が大きくならないメカニズムについても、耐漏洩特性のある積層板の設計に役立てるために今後詳しく解明する必要がある。

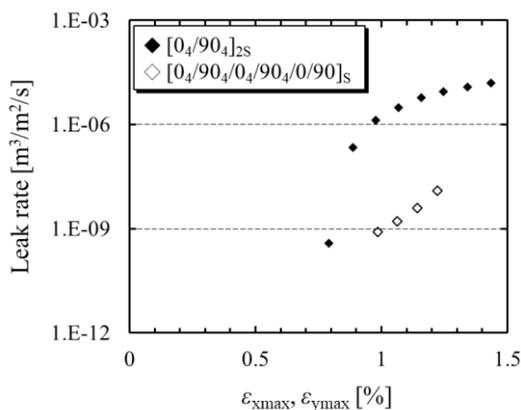


図8. 常温における負荷最大ひずみと漏洩量.

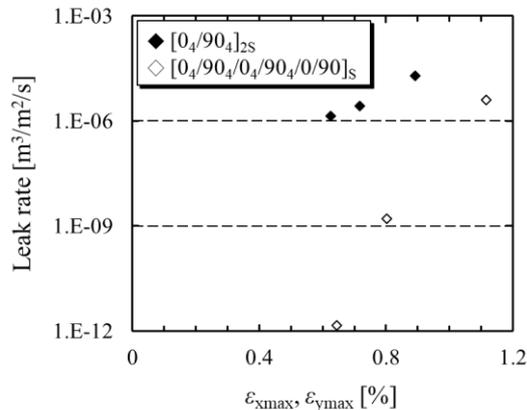


図9. 極低温における負荷最大ひずみと漏洩量.

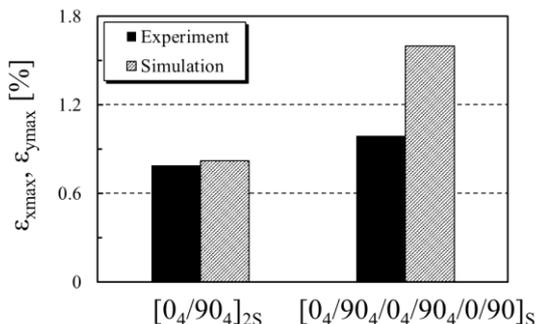


図10. 常温における漏洩発生最大ひずみ.

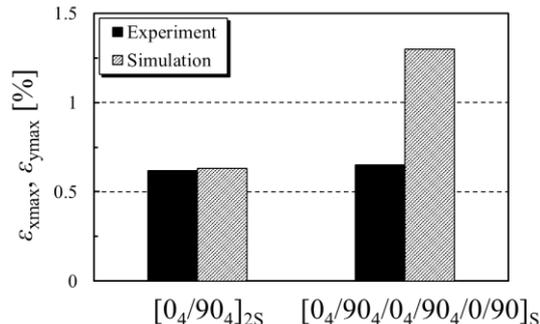


図11. 極低温における漏洩発生最大ひずみ.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 熊澤 寿	4. 巻 JAXA-RM-17-003
2. 論文標題 十字型二軸力学特性試験用極低温環境槽温度調節システム	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 宇宙航空研究開発機構研究開発資料	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hitoshi Hamori, Hisashi Kumazawa, Ryo Higuchi and Tomohiro Yokozeki	4. 巻 230
2. 論文標題 Numerical and experimental evaluation of the formation of leakage paths through CFRP cross-ply laminates with leak barrier layers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 111530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111530	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hitoshi Hamori, Hisashi Kumazawa, Ryo Higuchi and Tomohiro Yokozeki	4. 巻 245
2. 論文標題 Gas permeability of CFRP cross-ply laminates with thin-ply barrier layers under cryogenic and biaxial loading conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 112326
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112326	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 羽森 仁志、熊澤 寿、横関 智弘
2. 発表標題 極低温環境下におけるCFRP 積層板のリークパス形成に関する損傷解析
3. 学会等名 第10回日本複合材料会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 羽森 仁志, 熊澤 寿, 樋口 諒, 横関 智弘
2. 発表標題 異なる環境温度下におけるCFRP積層板のリークパス形成に関する損傷解析
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 羽森 仁志、熊澤 寿、横関 智弘
2. 発表標題 薄層を用いたCFRP 積層板の二軸荷重下における漏洩特性評価
3. 学会等名 第61回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Hamori, Hisashi Kumazawa, and Tomohiro Yokozeki
2. 発表標題 NUMERICAL STUDY OF THE FORMATION OF LEAKAGE PATHS THROUGH CFRP LAMINATES FOR CRYOGENIC PROPELLANT TANKS
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Composite Materials 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hitoshi Hamori, Hisashi Kumazawa, and Tomohiro Yokozeki
2. 発表標題 EXPERIMENTAL EVALUATION OF GAS PERMEABILITY OF THIN PLY CFRP LAMINATES UNDER BIAXIAL LOADING
3. 学会等名 16th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	横関 智弘 (Yokozeki Tomohiro) (50399549)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	