

機関番号：12601

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760648

研究課題名 (和文) 極低温燃料タンク用CFRPの繰返し負荷下における損傷挙動とガス漏洩特性の解明

研究課題名 (英文) Investigation of damage behavior and gas permeability of CFRP laminates under cyclic loadings for cryogenic propellant tank application

研究代表者

横関 智弘 (YOKOZEKI TOMOHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：50399549

研究成果の概要 (和文)：

宇宙輸送機用極低温燃料タンクへの炭素繊維複合材料 (CFRP) の適用性評価を目的として、タンク構造に作用する荷重 (引張及び面外荷重) を想定した繰返し荷重下における CFRP 内の累積損傷挙動把握と燃料漏洩量との関連を実験的に調査した。微視的損傷などの発生・累積挙動を把握すると共に、致命的な燃料漏洩が生じる閾値を見出し、CFRP タンクが健全に製造されれば、ある程度の荷重や繰返し数までは、安全性を保てることを示した。

研究成果の概要 (英文)：

Damage behavior and fuel leakage through the accumulated damages in carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) under cyclic loadings were experimentally investigated to evaluate the applicability of CFRP to the cryogenic fuel tanks of space launch vehicles. Formation and accumulation behavior of microcracks and its relation to the fuel leakage were clarified. It was shown that CFRP laminates exhibit no leakage up to the specific load level, even when some damages are induced.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：航空宇宙構造力学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：構造・材料、極低温燃料タンク、複合材料

1. 研究開始当初の背景

我が国における自在な宇宙活動能力を確立するための基盤的技術として、宇宙輸送機の高性能化や再使用輸送システムの実現があげられる。宇宙輸送機の軽量化は、機体性能向上や打ち上げコスト低減に劇的なインパクトを与えるものであり、炭素繊維複合材料 (Carbon fiber reinforced plastics, CFRP) などの先進複合材の機体構造への適用

が期待される。その中でも、構造重量の大半を占める燃料タンクの CFRP 化が根幹技術であるが、H-IIA ロケットなどように推進剤としては液体水素 (沸点：-253℃) / 液体酸素 (沸点：-183℃) をはじめとする極低温推進剤が使用されることが多く、極低温環境下で使用可能な複合材燃料タンクの実現性に関する研究が求められている。

CFRP などの高性能複合材料を極低温複合

材タンクへ適用する場合、CFRPの繊維方向とそれに垂直方向の熱膨張ミスマッチのため、極低温下において厳しい残留応力が複合材料内部に発生するため、CFRPの各層において繊維に沿った樹脂割れ（マイクロクラック）が積層板の破断よりも低い荷重レベルで蓄積する。そのため、連結したマイクロクラックを経路とした、タンク構造の厚み方向への燃料漏洩が構造の最終破断よりも大幅に先行して起こる可能性が高く、安全性や信頼性に問題を抱えている状況である。また、燃料漏洩を防止するために高压ガスタンクと同様に金属や樹脂のライナを配置する方式も検討されているものの、重量的なデメリットや、極低温環境下のため、複合材料との熱膨張ミスマッチによる構造破断の懸念もあり、採用しにくい状況であり、CFRP自体の耐燃料漏洩性の向上が求められる。さらに、再使用機の燃料タンクの場合、数100回以上の使用回数が必要とされ、運用期間も長期にわたるため、運用中の様々な荷重条件下におけるタンク構造の耐損傷性、構造健全性、耐燃料漏洩性が求められている。したがって、繰り返し荷重下におけるCFRPの損傷挙動と漏洩特性の関係を把握する必要がある。

2. 研究の目的

実際の燃料タンク構造に作用する荷重として、タンク内圧、打上げ・飛行時の静荷重及び振動荷重、極低温環境特有の厳しい熱応力などが考えられる。一方で、タンク構造の製造・組立て中や確認試験・点検中等に部品や工具、あるいは氷の落下により、不測の衝撃付与が極低温タンク壁面に生じる可能性も高いため、面外衝撃に対するタンク構造の安全性検討も必要である。

本研究では、実際の荷重条件を想定した、繰り返し引張荷重、繰り返し熱荷重、及び繰り返し衝撃荷重を受けるCFRPの損傷累積メカニズムを詳細に把握し、累積した層間剥離やマイクロクラックなどの損傷状態と燃料漏洩との関係を実験的に調べることで、複合材料燃料タンク構造の信頼性、安全性を向上させるための基盤的な知見を得ることが目的である。

3. 研究の方法

本研究では、引張荷重、熱荷重、面外衝撃荷重を繰り返し与えた際のCFRPの損傷累積メカニズムと、燃料漏洩特性との関係を把握することを目標としている。極低温環境でも優れた性能を発揮する高靱性エポキシを用いたCFRP供試体を製作し、繰り返し荷重を付与することにより誘発されるCFRP内の損傷累積挙動を非破壊検査により詳細に把握し、さらには荷重付与後の損傷を有する状態での複合材料のヘリウムガス漏洩評価を実施す

ることで、CFRP固有の損傷と燃料漏洩との関連を明らかにした。行った評価試験について、以下にまとめる。

(1) 繰り返し引張試験及び漏洩試験

設定した荷重レベルにおける繰り返し負荷を試験片に与え、所定の回数ごとに負荷をとめ、ヘリウムガス漏洩試験（図1）を実施し、漏洩量を計測した。また、軟X線探傷などの非破壊検査により、試験片内の損傷累積挙動を把握した。

(2) 繰り返し熱荷重試験及び漏洩試験

常温から液体窒素温度（-196℃）までの熱サイクル付与試験を実施した。各繰り返し回数ごとにヘリウムガス漏洩試験を実施し、漏洩量を計測した。また、非破壊検査により、試験片内の損傷累積挙動を把握した。

(3) 繰り返し面外衝撃試験及び漏洩試験

設定した衝撃エネルギーレベルにおいて落錘式の面外衝撃付与を繰り返し実施する。各繰り返し回数ごとにヘリウムガス漏洩試験を実施し、漏洩量を計測した。また、非破壊検査により、試験片内の損傷累積挙動を把握した。

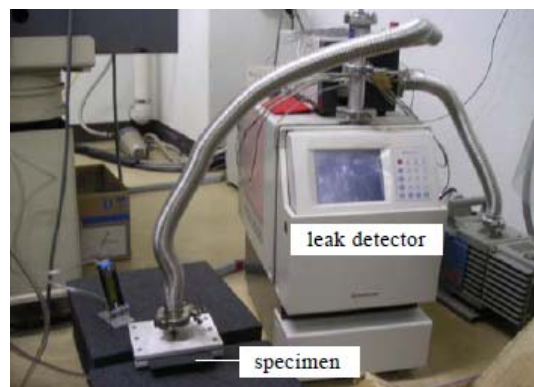
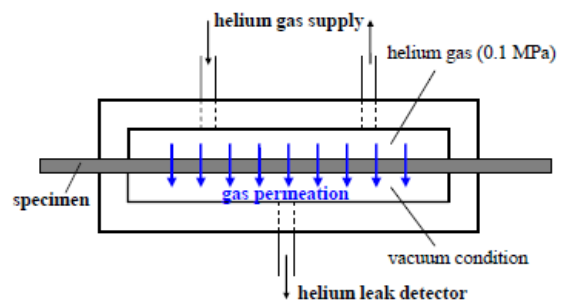


図1 ガス漏洩試験

4. 研究成果

(1) 繰り返し引張試験及び漏洩試験

CFRP積層板に引張の繰り返し負荷を与えると、負荷回数の増大と共に、マイクロクラックや層間剥離が多数発生していることがわかった（図2）。しかしながら、繰り返し後のガス漏洩試験においては、今回の試験片、試験条件においては、致命的なガス漏洩を生じ

ないことが判明した（無損傷の場合でも、分子拡散により $10^{-10} \sim 10^{-8}$ [Pa m³/s] 程度のヘリウムガス漏洩が生じ、繰返し負荷後においても同程度の漏洩量しか計測されなかった）。したがって、マイクロクラックや層間剥離などの微視的損傷は累積しているものの、それらの損傷が厚み方向に全て連結していない状況であれば、致命的なガス漏洩は生じないことがわかった。ある程度の荷重レベルまではたとえ損傷を生じていても燃料漏洩は生じないことが示された。

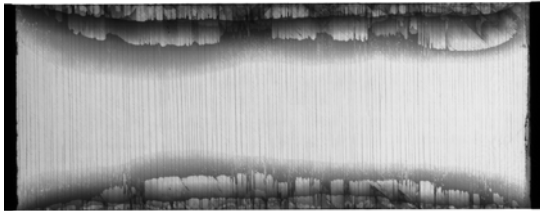


図2 CFRP 中の損傷

(2) 繰返し熱荷重試験及び漏洩試験

常温から液体窒素温度までの温度変化を CFRP に与え、熱応力に伴う損傷累積とガス漏洩評価を試みた。数 100 回のサイクル数までの結果では、目立った微視的損傷が発生せず、熱応力だけでは燃料漏洩も生じないことが示された。一方、簡易応力計算結果では、熱応力により、引張荷重でマイクロクラックが生じる応力レベルの 1/3~1/2 程度の応力が作用するため、引張との複合的な荷重が作用する場合は、損傷挙動にも熱荷重は影響を及ぼす可能性があることを示した。

(3) 繰返し面外衝撃試験及び漏洩試験

衝撃エネルギーレベル（単位板厚あたりの衝撃エネルギー）とガス漏洩量の関係を図3に示す。ある程度のエネルギーレベルまでは、ほとんど漏洩を示さない（ 10^{-8} Pa m³/sec 以下）のに対し、高エネルギーレベルになると急激な漏洩が計測された。また、漏洩の有無と損傷状態の関連を詳細に調べるため、CFRP 積層板内部の X 線 CT 観察を実施した（図4）。その結果、マイクロクラック、繊維座屈などの厚さ方向の損傷の連結が生じた場合に致命的な漏洩が誘発されることが確認された。

CFRP の衝撃荷重後のガス漏洩は、あるエネルギーレベルまでは損傷が生じていても致命的な漏洩はないこと、漏洩に対してエネルギーレベルの閾値が存在すること、衝撃側の繊維損傷を防ぐこと（緩衝材などの配置）がガス漏洩に対して有効であること、などが示唆された。

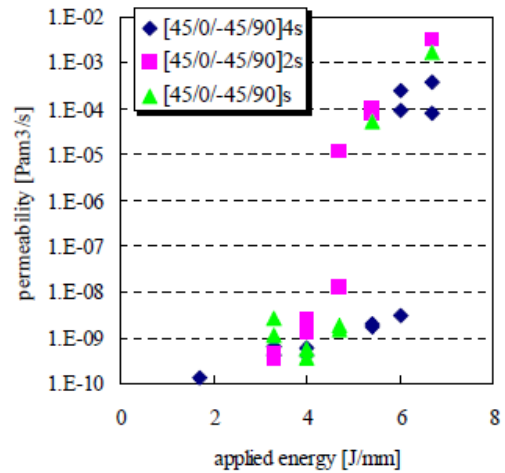
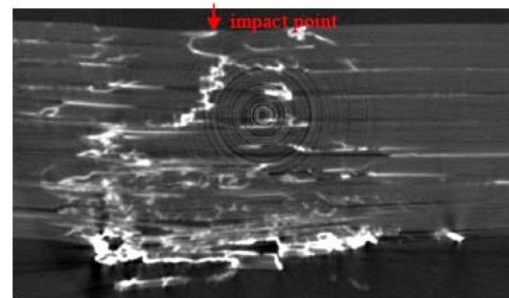
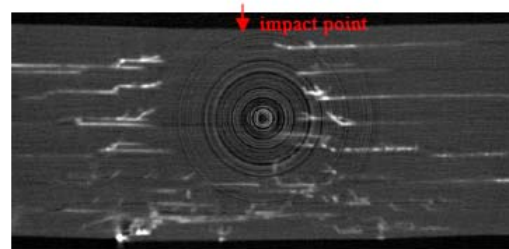


図3 衝撃エネルギーとガス漏洩量の関係



(a) [45/0/-45/90]_{4s} (6.0J/mm, severe leakage)



(b) [45/0/-45/90]_{4s} (5.4J/m, no leakage)

図4 衝撃部の X 線 CT 観察

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ① T. Yokozeki, A. Kuroda, A. Yoshimura, T. Ogasawara, T. Aoki, “Evaluation of gas permeability of CFRP laminates under cyclic loadings” Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan, Vol.8, No. ists27, PcNo. ists26, Pc. 5-9 (2010).
- ② T. Yokozeki, A. Kuroda, A. Yoshimura, T. Ogasawara, T. Aoki, “Permeation - after - impact properties of CFRP laminates

for use on propellant tanks”, Transactions of JSASS, Space Technology Japan, Vol. 7, No. ists26, Pc19-23 (2009).

[学会発表] (計 1 件)

- ① T. Yokozeki, A. Kuroda, A. Yoshimura, T. Ogasawara, T. Aoki, “Evaluation of gas permeability of CFRP laminates under cyclic loadings” 27th International Symposium on Space Technology and Science, 7 July 2009, Tsukuba, Japan.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横関 智弘 (YOKOZEKI TOMOHIRO)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：50399549

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし