

機関番号：51303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760104

研究課題名(和文) 極低温液体タンク用繊維強化プラスチックのキャビテーションによる損傷の研究

研究課題名(英文) Study on influence of cavitation in liquefied tanks on component materials of cryogenic tanks

研究代表者

熊谷 進 (KUMAGAI, Susumu)

仙台高等専門学校・マテリアル環境工学科・准教授

研究者番号：30390389

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、極低温タンク内圧の変化によって生じるキャビテーションによる繊維強化プラスチックの損傷機構を明らかにすることを目的として、ハイドロフルオロカーボンガスを加圧・減圧してキャビテーションを繰り返し発生させる装置を開発・使用し、ガラス繊維強化プラスチックのキャビテーション負荷試験を行ったものである。試験片表面をレーザー顕微鏡観察し、初期表面き裂・空孔の深さがキャビテーション負荷回数増加に伴い変化することを明らかにした。また、見掛けの層間せん断強さを評価し、表面損傷が大きくなることによる応力集中部の緩和により見かけの層間せん断強さが増大する傾向にあることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Lightweight fuel tank to be used as next generation transport equipment is required long time durability and high intensity. When discharged from liquefied gas tank of liquefied gas, damage occurred to tanks material by cavitation. This study is intended to damage process of the tanks material caused by cavitation in tank. Glass fiber reinforced plastic (GFRP) are considered as the tanks materials. R-134a used as pressure-liquefied gas at 273 K was boiled by instantaneous depressurization. Specimens of GFRP were immersed in the cyclic condition. Laser microscope measurements for the surface of GFRP specimens reveal complex change in the depth of vacancies with cyclic cavitation condition. Interlaminar shear strength of each GFRP specimen obtained from short beam three point bending tests in accordance with JIS K 7057:2006 is also affected by the cyclic condition.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：損傷 キャビテーション 繊維強化プラスチック 液体タンク

### 1. 研究開始当初の背景

厳しい二酸化炭素排出削減義務を達成する上で、水素利用の早急な実用化・インフラ整備が期待されている。水素の貯蔵方式は種々検討されているが、大規模な貯蔵・輸送手段としてこれまで工業的に最も実績があるのは液体水素であり、今後も液体水素貯蔵・輸送方式は重要な基盤技術である。液体水素は質量あたりの発熱量がガソリンと比べて3.2倍と極めて高い一方で、体積あたりの発熱量が約1/4しかない。そのため、高効率化の観点から大きな容積で軽量のタンクの開発が求められており、比強度および熱絶縁性に優れる炭素繊維強化プラスチックが輸送用途の液体水素タンク材料として期待されている。

現在、極低温液体タンクにおける炭素繊維強化プラスチックの使用に関しては、ロケット推進薬用液体水素・酸素のタンク材料候補あるいは燃料電池自動車用タンクとして研究開発が進められている。しかしながら、繊維強化プラスチックは、極低温への冷却に伴い母材と強化材の線膨張係数の差により多数の微視き裂が発生し、タンク寿命および健全性上問題となっている。極低温における繊維強化プラスチックに関する各種研究分野の動向は、強度評価に関しては核融合炉の超伝導マグネット材料として使用されるガラス繊維強化プラスチックを対象にデータが蓄積し、JIS化、ISO化への動きが着実に進められている。また、ロケットタンクの候補材料として検討される炭素繊維強化プラスチックに関する各種データの蓄積も進められているが、極低温液体に曝されることによる損傷過程について詳細な学術的研究が加えられていないのが現状である。

液体水素は蒸発エンタルピーが小さいため、熱擾乱でタンク内壁近辺でキャビテーションが生じ易い。炭素繊維強化プラスチックの微視き裂内でキャビテーションが発生した場合、微視き裂が進展し、長期的にはタンクからの液体水素リークにつながる。また、リークによってタンクの熱絶縁性が低下することで、タンク外殻に液化空気が吸着し、液化空気の沸騰でタンク外殻にはく離が生じ、タンク構造全体に深刻なダメージを与えることも想定される。したがって、キャビテーションによる繊維強化プラスチックの損傷を定量的に評価する技術体系を構築することは、炭素繊維強化プラスチック製液体水素タンクの実用化および長寿命化に必要な不可欠であり、これが本研究の着想に至った経緯である。

### 2. 研究の目的

水素利用における、液体水素輸送・貯蔵の

高効率化に資する繊維強化プラスチックのタンク材料への適用には、液体水素の沸騰（キャビテーション）による損傷の定量的評価が必要である。本研究は、液化ガスを加圧・減圧してキャビテーションを繰り返し発生させる装置を開発・使用し、タンク内圧の変化によって生じるキャビテーションによる繊維強化プラスチックの損傷機構を明らかにし、極低温タンクへの繊維強化プラスチックの適用拡大および健全性向上を図り、安全な水素社会実現を目的としている。

### 3. 研究の方法

冷媒ガス R-134a を凝縮・再液化し、ガラス繊維強化プラスチック (G11) 試験片を液化ガスに浸漬する。その後、タンクの内圧を上昇させ、開放弁を開くことで、压力容器内の液化ガスを急減圧させて、キャビテーションを発生させ試験片に沸騰負荷を与える。キャビテーションによる微視き裂の初生・進展を評価するため、走査型電子顕微鏡およびレーザー顕微鏡による試験片表面のき裂進展量測定を行う。また、超音波探傷器による非破壊評価試験を実施し、内部はく離の検出を行う。

積層構造を有する織物繊維強化プラスチックの場合、キャビテーションによる損傷は繊維と母材間のはく離が支配的であると予想される。そのため、力学特性（強度）に及ぼすキャビテーションの影響は JIS K 7057 規格（ガラス繊維強化プラスチックの層間せん断試験方法）に準拠した3点曲げ試験による見掛けの層間せん断強度評価を行う。

### 4. 研究成果

本研究は、図1に示す液化ガスを加圧・減圧してキャビテーションを繰り返し発生させる装置を開発・使用し、タンク内圧の変化によって生じるキャビテーションによる繊維強化プラスチックの損傷機構解明を図った。実験は、ハイドロフルオロカーボンガスを圧縮・熱交換して圧力タンク内で液化し、圧力タンク内の試験片を浸漬し、弁開放による急減圧で液化ガスを沸騰させることで試験片にキャビテーション負荷を与えることで行った。

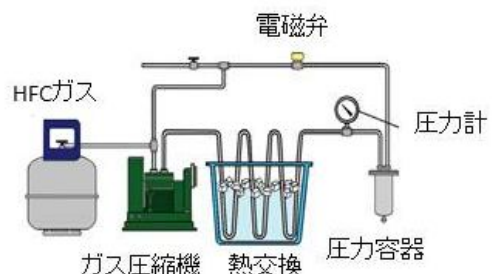


図1 繰返しキャビテーション負荷装置

実験に供したガラス繊維強化プラスチック試験片の表面をレーザ顕微鏡で観察し、初期表面き裂・空孔に注目して、キャビテーション負荷による深さおよび形状の変化を測定した。図2は試験片積層表面のレーザ計測結果（縦軸は深さ、横軸は試験片端部からの距離）であり、未負荷の初期表面と同じ場所を20回および40回負荷後に計測したものである。初期表面き裂・空孔はキャビテーション負荷回数の増加に伴い、赤い矢印で示すき裂のように深さ・幅方向に増大する場合と青い矢印で示すき裂のように減少し、表面が平滑化される場合があることを明らかにした。レーザ計測断面観察において得られた空孔周囲の変化に関する2つのパターンを模式的に図3に示す。空孔周囲においてキャビテーションが発生し、底部を残して周囲を壊食するパターン1と、空孔底部および空孔周囲を壊食するパターン2が観察され、これらの壊食を繰り返しながら損傷進展している。図4は各キャビテーション繰り返し数において計測したき裂・空孔の深さの平均値を示したもので深さの平均値は増大する傾向にある。

ガラス繊維強化プラスチックの力学特性に及ぼすキャビテーションの影響を評価するためJIS K 7057:2006に準拠したガラス繊維強化プラスチックの見掛けの層間せん断強さを評価した。図5に示すように見かけの層間せん断強さはキャビテーション負荷の影響を受けて変化した。キャビテーション負荷により表面のき裂・空孔深さは増大する傾向にあるが、表面損傷が大きくなることによる三点曲げにおける応力集中部の緩和により見かけの層間せん断強さは増大する傾向にあることを明らかにした。

タンク内のキャビテーションは力学的負荷に比べて無視できるほど小さいためほとんど検討されてこなかったが、本研究の結果、少ないキャビテーション繰り返し数でも表面の損傷は進展しており、力学特性にも変化を与えていることが明らかになった。今後、液体水素や高压液化水素タンクではさらに厳しい環境でのキャビテーションが生じるため今後、理論・実験両面からのより詳細な説明が望まれる。

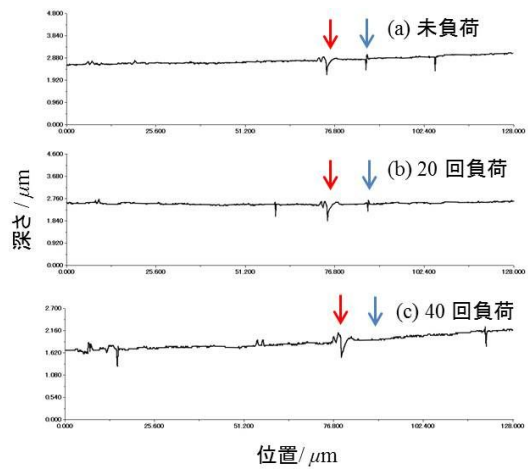


図2 レーザ計測による積層表面の変化測定

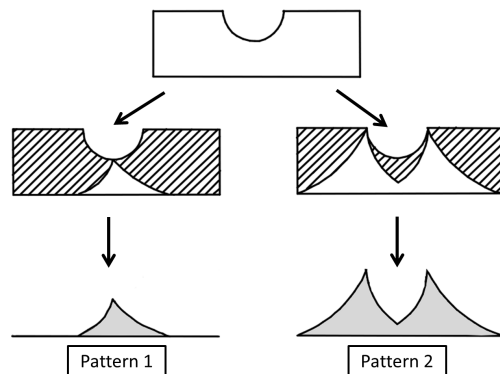


図3 空孔周囲のキャビテーションによる損傷の模式図

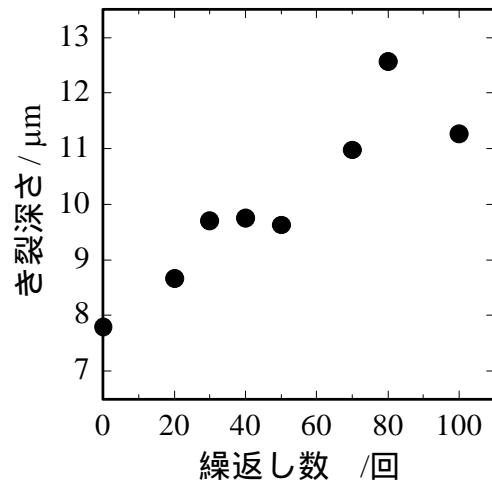


図4 キャビテーションによるき裂深さ（平均値）の変化

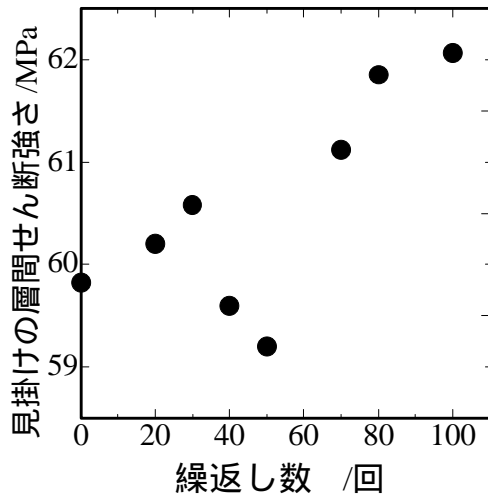


図5 キャビテーションによる見掛けの層間せん断強さの変化

## 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0件)

〔学会発表〕(計3件)

櫻井 香織, 熊谷 進, ラマン分光を用いた熱可塑性樹脂の表面損傷評価に関する研究, 第19回高専シンポジウム in 久留米, 2014. 1. 25, 久留米高専

橋本 悠希, 熊谷 進, 廣 和樹, タンク内キャビテーションによる損傷評価法の開発, 第19回高専シンポジウム in 久留米, 2014. 1. 25, 久留米高専

橋本 悠希, 熊谷 進, 廣 和樹, ガラス繊維強化プラスチックの強度に及ぼすタンク内キャビテーションの影響, 日本機械学会2012年度年次大会, 2012.9.12, 金沢大学

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

熊谷 進 (KUMAGAI, Susumu)

仙台高等専門学校・マテリアル環境工学科・准教授

研究者番号：30390389