

液体ロケット再生冷却燃焼器の 残留ひずみ分布の評価

Residual Strain Distribution in a Regenerative Cooled Liquid Rocket Combustion Chamber Wall

利用者 森谷 信一¹⁾、升岡 正¹⁾、鈴木 裕士²⁾
Shinichi MORIYA, Tadashi MASUOKA, Hiroshi SUZUKI

所属 1)宇宙航空研究開発機構、2)原子力機構

概要

液体酸素／液体水素を推進剤とする液体ロケット燃焼器の内壁は、一方を高温燃焼ガスによる加熱を、もう一方を極低温の液体水素により冷却されており、極めて過酷な温度勾配に曝されている。その結果、冷却溝部には過大な熱ひずみが発生しており、それが要因となって液体水素冷却剤の漏洩を引き起こす損傷が発生する。燃焼器冷却溝部の強度評価並びに寿命評価は、有限要素解析により行われるが、解析結果を検証するための実験データがほとんどないのが実状である。そこで本課題では、解析結果検証用データの取得の一環として液体ロケット燃焼器内部の残留ひずみ分布の測定を試みた。

キーワード 液体ロケットエンジン、再生冷却燃焼器、冷却溝、残留ひずみ、RESA

1. 目的

図1にロケット燃焼器の構造の概要を示す。液体水素で冷却されるロケット燃焼器は、厚さがわずか1mmの壁の片方が高温燃焼ガスに、もう一方が極低温の液体水素に曝され、極めて大きな温度勾配に耐える必要がある。この大きな温度勾配に起因する熱ひずみにより損傷が発生する。この部位の残留ひずみを測定する必要があるが、非常に高い位置決め精度が要求される。前年度までの試験により、外側からは不可視な冷却溝の位置を把握するためのダイレクトビームスキャン法の考案、適切な回折強度を得るために必要な測定時間の確認、粗大粒によるばらつき低減のための揺動の有効性の確認等を行い、狭小な冷却剤通路周囲のひずみ分布測定手法の目途付けを得た。本課題では燃焼試験後のサブスケール燃焼器を対象に残留ひずみ分布の測定を試行し、有限要素解析結果との比較を試みた。

2. 方法

本試験で用いた燃焼器は、内筒がCr-Zr銅合金、外筒が銅電鍍層で形成されている。内筒には、液体水素冷却剤通路が周方向に等間隔に設けられている。試験はRESAにおいて行った。試験時のセットアップの様子の写真を図2に示す。供試体は3軸方向可動のゴニオメータおよび回転テーブル上に設置され、任意の検査領域の高精度な位置決めが可能となっている。燃焼器断面上のゲージ体積と測定するひずみの方向を図3に示す。ここで、燃焼器内部の冷却溝は外部から不可視なため、予め冷却溝の位置を正確に把握しておく必要がある。そのため、図4に示すようなダイレクトビームスキャン法を用いた。これは、中性子照射スリット-供試体-コリメーター-検出器を一直線上に配置し、供試体の中心軸を固定して回転させた時に、検出されるビーム強度から冷却溝の位置を検出するものである。すなわち、冷却溝のあるところを通過する場合には、透過する金属壁厚さが小さくなるため検出されるビーム強度は増加し、溝でないところを通過する場合には、透過する金属壁厚さが大きくなるために検出ビーム強度は低下する。次に、残留ひずみの測定は、温度・圧力計測用ポートが設置されていないスロート部の上流（スロート部から66.4mm）とし、変形が最も厳しくなる冷却溝リガメント部中央と、リブ中央に沿って燃焼器内面から5.25mmまでとした。昨年度の検討結果から1点あたりの測定時間を85分とし、±5°の揺動を与えて測定を行った。揺動の模式図を図5に示す。ゲージ体積の重心を中心にして周方向に角度を振ることにより、ゲージ体積中の結晶粒数を増やし、測定結果のばらつき低減に効果がある。また、図6にひずみ測定を実施した位置を燃焼器断面図上に示す。冷却溝リガメント中心は隣り合う5点(C1~C5)を、リブ中心線上は隣り合う5本のリブ(R1~R5)上の2~5点の測定を行った。

3. 研究成果

図7にダイレクトビームスキャン結果の一部を示す。図7に示すように、測定されたビーム強度は燃焼器の回転角に対して周期的に変化しており、この周期は冷却溝の間隔と一致している。本結果から、冷却溝の位置を把握した。次に、冷却溝リガメント中心における残留ひずみ測定結果を図8に、リブ中心線上における残留ひずみ測定結果を図9にそれぞれ示す。図8より、冷却溝リガメント中心の残留ひずみは0.05%前後の引っ張りひずみとなっていることが分かる。一方、図9よりリブ中央線上の残留ひずみ分布は、燃焼器内面近傍は引っ張り側で、外周側へいくにつれて圧縮側へと変化している。また、図8および図9には有限要素解析により得られた残留ひずみも併せて示した。解析結果の方が測定結果よりも若干大きい傾向を示しており、解析において使用しているパラメータについて検討が必要であると考えられる。

4. 結論・考察

燃焼試験実施後の燃焼器を対象に、残留ひずみ分布の測定を試行した。ゴニオメータ上の供試体回転テーブルと燃焼器の軸芯合わせの高精度化、ダイレクトビームスキャンによる燃焼器内冷却溝の正確な位置把握、適正な計測時間の確保、粗大粒による回折強度のばらつき低減のための揺動の採用等により、燃焼器内部の冷却溝周りの残留ひずみ分布の測定が可能であることを実証した。

5. 参考文献等

- 1) 升岡正, 佐藤正喜, 森谷信一, 土屋佳則, 鈴木裕士, 飯倉寛, 松林政仁, 中性子を用いた液体ロケット再生冷却燃焼器の非破壊検査, 日本航空宇宙学会論文集, 第 58 巻, pp.10-16, 2010
- 2) M.Tadashi, S.Moriya, M.Sato, Y.Tsuchiya, H.Suzuki, "Feasibility Study on Neutron Diffraction Method for Evaluation of Residual Strain Distribution of Regenerative Cooled Combustion Chamber", TSTJ:Vol.7, 2009

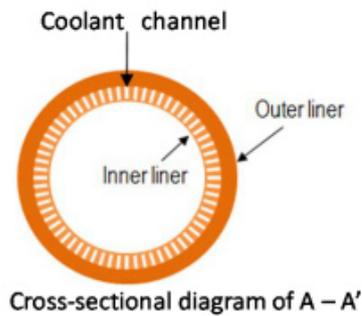
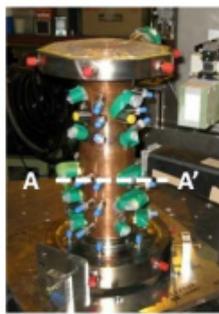


図 1 燃焼器の断面構造の概要

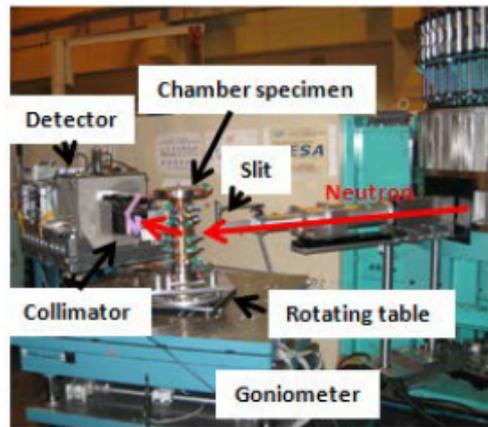


図 2 試験時のセットアップの様子

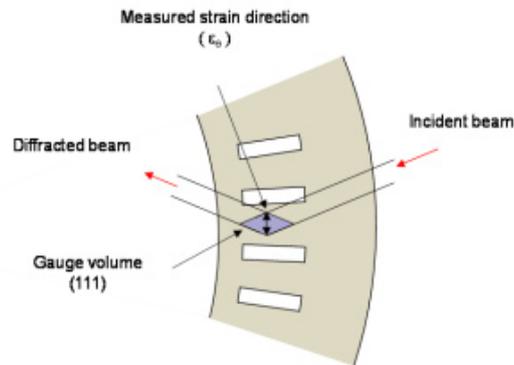


Fig. 7 Schematic of gauge volume and measured strain direction on cross section of chamber specimen

図 3 ゲージ体積と測定するひずみの方向の模式図

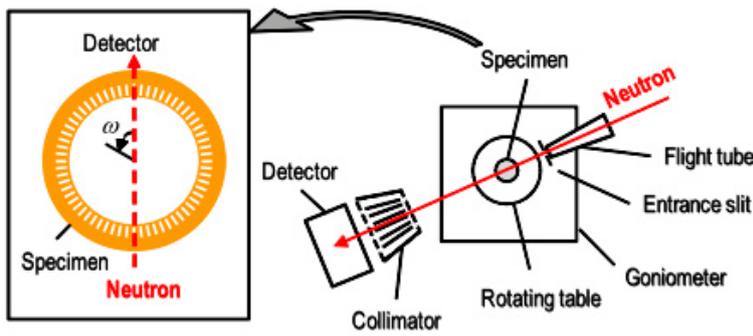


図4 ダイレクトビームスキャンの概要図

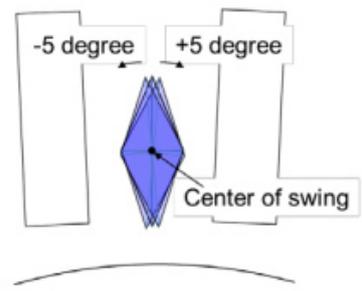
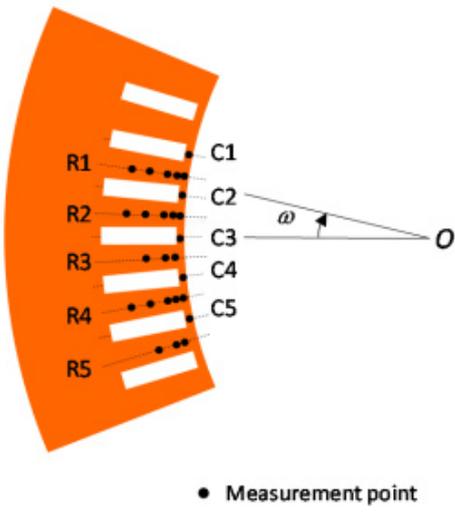


図5 揺動の模式図



● Measurement point

No.	ω [degree]	Phase	Depth from inner surface [mm]
C1	11.3	Channel	0.5 (midst of ligament)
C2	5.7	Channel	0.5 (midst of ligament)
C3	0.1	Channel	0.5 (midst of ligament)
C4	-5.5	Channel	0.5 (midst of ligament)
C5	-11.1	Channel	0.5 (midst of ligament)
R1	8.5	Rib	0.75, 1.35, 2.63, 3.90, 5.25
R2	2.9	Rib	0.75, 1.35, 2.63, 3.90, 5.25
R3	-2.7	Rib	1.35, 2.63, 3.90
R4	-8.3	Rib	0.75, 1.35, 2.63, 3.90, 5.25
R5	-13.9	Rib	1.35, 3.90

図6 残留ひずみ分布測定位置

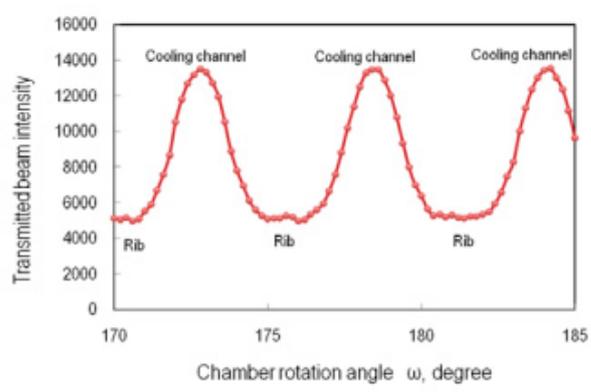


図7 ダイレクトビームスキャンの測定例

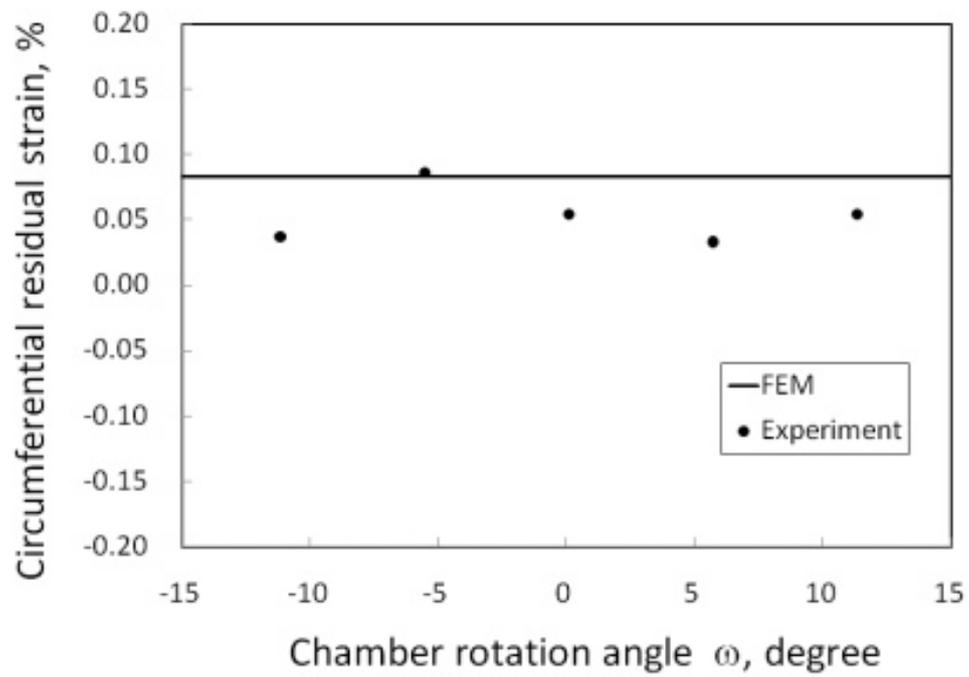


図 8 冷却溝リガメント中心 (C1~C5) の残留ひずみ

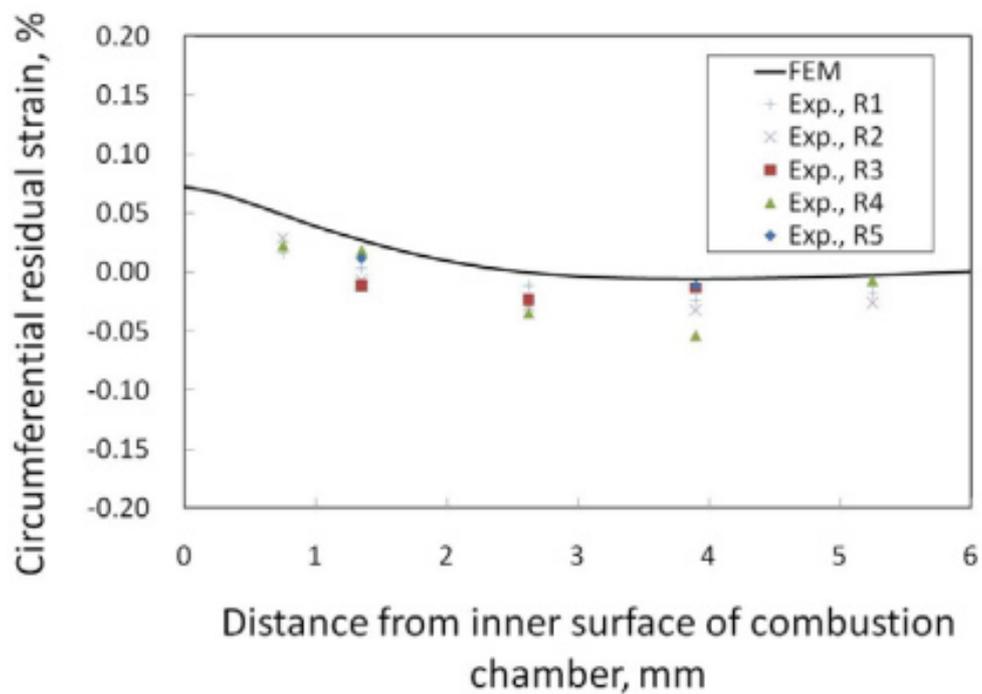


図 9 リブ中央 (R1~R5) に沿った残留ひずみ分布