

## B10 大型ロケットのエンジン燃焼室銅合金におけるクリープ疲労現象

山本鴻司（東大院），出口雅也（東大院），戸部裕史（ISAS/JAXA），佐藤英一（ISAS/JAXA）

Koji Yamamoto (The University of Tokyo), Masaya Deguchi (The University of Tokyo),

Tobe Hirobumi (ISAS/JAXA), Eiichi Sato (ISAS/JAXA)

### 1. 背景

H-IIA ロケットをはじめとしたH系ロケットは、LE-7A エンジン、LE-5B エンジンなど、燃料に液体水素、酸化剤に液体酸素を用いた液体ロケットエンジンを搭載している。液酸/液水系ロケットエンジンは再生冷却を利用しており、推進剤の反応による高温の燃焼ガスに曝される燃焼室内壁を冷却するため、内筒の中に冷却溝を設け、その中に液体水素を流している。この時同時に気化する水素ガスを燃焼に利用している。効率の良い冷却を実現するため、燃焼室内筒材料には高い熱伝導率を持つ材料が要求され、実際には銅合金が用いられている。

高温の燃焼ガスと、冷却溝内を流れる液体水素を隔てる銅合金の厚さは1 mm 程度であり、リガメントと呼ばれるこの部分はロケットエンジンの燃焼を通して大きな熱応力を受ける。その結果、実機の燃焼試験において燃焼動作を繰り返した際、約20 サイクルで燃焼室内壁に1 mm 程度の亀裂が生じたことが確認された。この20 という燃焼繰り返し数は、従来の寿命予測法で見積もられていた亀裂発生試行回数の半分以下であり[1]、製造コストを抑えた信頼性の高いエンジンを開発していく上で、大きな障害となった。

従来の予測に比較して早期に亀裂が発生したことを受け、JAXA 情報計算工学センターは、エンジンの燃焼を通して内筒銅合金が経験する温度や応力サイクルについて、数値解析を実施した[2]。その結果、亀裂が生じた部分は、エンジンの起動時には圧縮の塑性変形、数百秒間の定常燃焼時には極低速の引張変形、停止時には引張の塑性変形という「極低速引張変形を伴う低サイクル疲労」を受けているということが明らかになった（図1）。極低速引張変形を伴う低サイクル疲労とは、起動時と停止時の塑性変形が繰り返される疲労と、定常燃焼時のほぼ一定の応力を受けてひずみが増加していくクリープとが重畳した「応力保持型のクリープ疲労現象」であると言える。

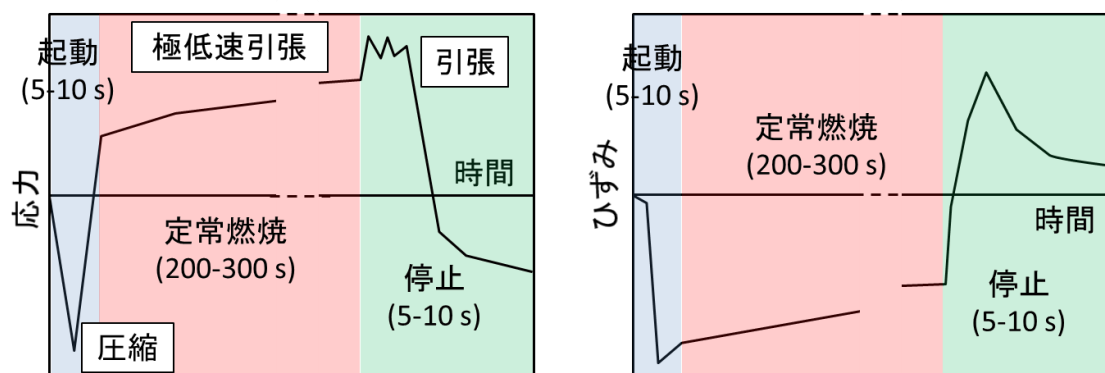


図1 数値解析結果[2] (左:応力履歴、右:ひずみ履歴)

そもそもクリープ疲労現象とは、クリープと疲労とが材料に交互に負荷され重畳する現象のことで、高速増殖炉など原子力プラントの構造材料に用いられている耐熱ステンレス鋼[3]や、超高温ガス炉など

次世代原子炉の炉心、炉外用材料に用いることが検討されているニッケル基超合金[4]、航空機エンジンのタービンブレードなどで生じるとされている。そのため、クリープ疲労現象について扱った既往の研究では、運転中の高温下での一定荷重によるクリープと、メンテナンスなどに伴うスタート、シャットダウン時の熱勾配により誘起される疲労との相互作用について報告されてきた。ところがこれらの研究の大半における模擬実験では、クリープ区間はひずみが保持されており、その間応力は低下する（応力緩和挙動）。応力緩和挙動を示すこのクリープ疲労現象は、先述の応力保持型と区別し「ひずみ保持型のクリープ疲労現象」という別の現象であると言え、ひずみ保持型に比して応力保持型を扱った報告の数は限られている。そこで当研究室では、先に述べた数値解析結果[2]を参考に、ロケットエンジンの燃焼中に燃焼室内筒銅合金が受ける、応力保持型のクリープ疲労現象を模擬した材料試験を実施し、その損傷過程について考察した。その結果、ロケットエンジンの燃焼室内筒銅合金の劣化損傷過程について、生じた疲労亀裂と成長したクリープポイドとが連結することで損傷が加速するということが明らかにした[5]（図2）。

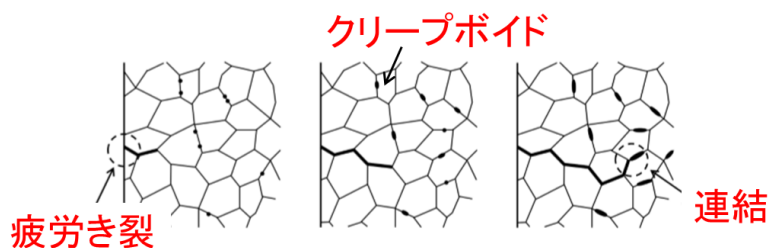


図2 燃焼室銅合金の損傷メカニズム[5]

現在 JAXA では、新型基幹ロケットに搭載する新たなロケットエンジンを開発している。このエンジンの内筒においても、応力保持型クリープ疲労現象が生じ過大な負荷が掛かることが十分に予見されることから、設計の段階で詳細なシミュレーションが実施された。その結果、内筒銅合金が受けるクリープ疲労は、ひずみ範囲や保持応力の正負や大きさ、温度など種々のパラメータが、エンジンの設計思想や燃焼方式、冷却溝を通過する液体水素の流量によって、また同一のエンジンでも部位によって大きな幅を以て変化するということが明らかになった。

応力保持型のクリープ疲労現象について、温度や保持応力など種々のパラメータを広範に変化させた報告が少なく、材料科学的に解明されたとは言いがたいことを踏まえても、また現在開発中のロケットエンジンだけに留まらず、今後新たに液酸/液水系ロケットエンジンの開発を進めていく上でも、応力保持型のクリープ疲労現象を包括的に理解する必要がある。本報告では、ロケットエンジンの燃焼室銅合金が受ける応力保持型のクリープ疲労現象に焦点を当て、エンジンの燃焼シミュレーション結果から様々な派生した条件での模擬試験を実施し、考察を行った。

## 2. 実験

Cu-0.7Cr-0.09Zr (mass%)を対象に、実機エンジンの燃焼試験を模擬した材料試験を実施した。実施温度は 750 K で、真空度は 10 Pa 以下の雰囲気中で、図 3 に示すような応力プロファイルを繰り返し負荷した。高温用接触式ひずみ計を用いて試験中のひずみ変化を計測した。本報告では条件を種々に変化させた内、保持応力-50 MPa、-35 MPa の試験結果について主に述べる。

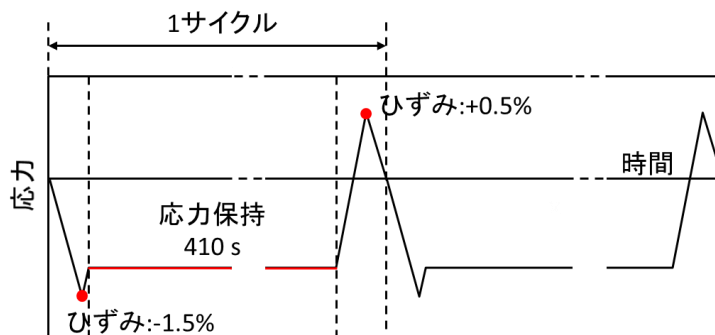


図3 実施したクリープ疲労試験の  
応力プロファイル

### 3. 結果

保持応力-35 MPa の試験では、1、25、125 サイクルの応力ひずみヒステリシスループ (図 4) を見るとわかるように、クリープひずみは試験全体を通して蓄積されていない。この試験では目立った変化は観測されず、142 サイクルで中断した。保持応力-50 MPa の試験では、各サイクルの応力ピーク (図 5) はサイクルの進行に伴い低下している。しかしながらこの試験でも試験片は破断しておらず、応力保持中に伸び計の測定下限を超過し 60 サイクルで中断した。1、10、50 サイクルの応力ひずみヒステリシスループ (図 6) を見ると保持応力-35 MPa の時と異なり応力保持中にクリープひずみが蓄積していることがわかる。また、クリープひずみの蓄積は図 7 の通り逆遷移挙動を示した。逆遷移挙動については考察にて後述する。

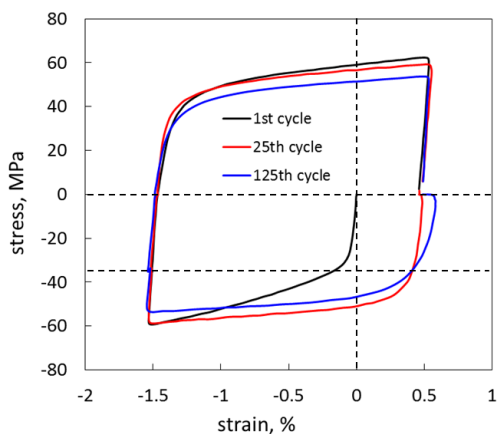


図4 保持応力-35 MPaの試験における  
第1、25、125サイクルの  
応力-ひずみヒステリシスループ

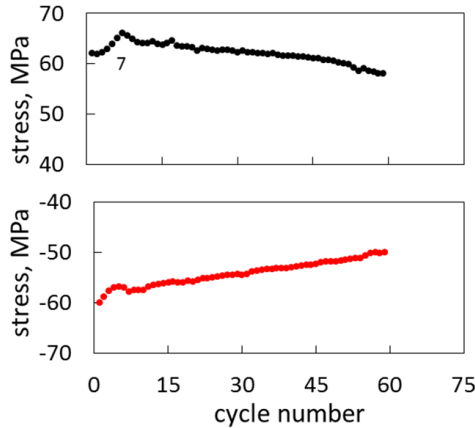


図5 保持応力-50 MPaの試験における  
サイクル毎のひずみ+0.5%の引張応力(上)  
ひずみ-1.5%の圧縮応力(下)

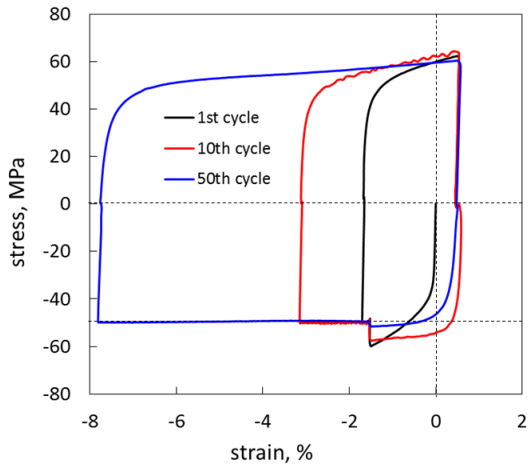


図6 保持応力-50 MPaの試験における  
第1、10、50サイクルの  
応力-ひずみヒステリシスループ

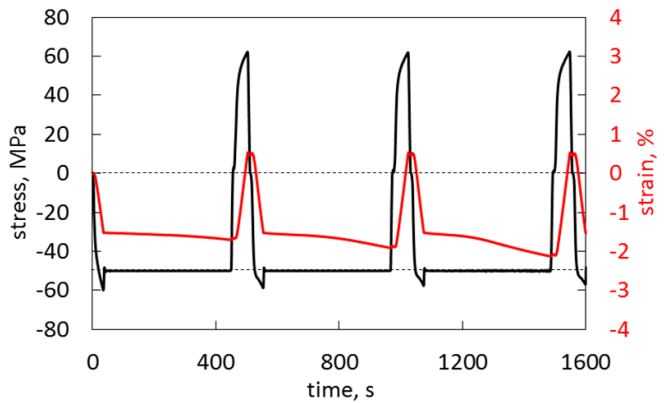


図7 保持応力-50MPaの試験における  
応力、ひずみ履歴(一部)

#### 4. 考察

保持応力-35 MPa の試験において、百数十回サイクルを繰り返してもクリープひずみが観測されなかったことは、ロケットエンジンの要求燃焼サイクルのオーダーである数十サイクルでは影響が無いことを示唆している。一方で保持応力-50 MPa の試験では、サイクルの進行に伴いピーク応力は低下し、クリープひずみは増加した。これにより、本材料が試験の経過により軟化し、破断には至らないものの微視組織レベルで損傷していることが予測される。

クリープ変形とは、高温下に於いて一定応力が材料に負荷されることで生じる変形のことであり、ひずみやひずみ速度の時間変化などによって、遷移クリープ域、定常クリープ域、加速クリープ域の3つのフェイズに分けられる。クリープ変形の初期領域である遷移クリープ域では一般的に、ひずみの時間変化は加工硬化に伴い材料が変形し難くなることを反映し、引張クリープならば上に凸、圧縮クリープならば下に凸に変化する。しかしながら今回の試験に於いて、クリープひずみが蓄積された保持応力-50 MPa の試験では、クリープ区間のひずみは圧縮クリープであるにもかかわらず上に凸の時間変化を示し、

これは加工に伴い軟化したことを示している。逆遷移クリープと呼ばれるこの挙動は、チタンの常温クリープ[6]やAl-Mg系合金[7]などで確認されており、応力負荷前に酸素原子など侵入型原子が固着されていた転位が、応力が負荷されることで固着雰囲気解け、可動転位となることが原因であるとされている。Cu-Cr-Zrの本材料については、試験中の応力が引張から圧縮に切り替わることで、引張時に絡まった転位が解け、多数の稼働転位が一定保持された高応力化で移動し易くなることが軟化現象として表れていると考えられる。

## 5. 結言

ロケットエンジンの燃焼シミュレーション結果に基づき、応力保持型のクリープ疲労試験を実施した。保持応力-35 MPaの試験では、実機エンジンにおける亀裂発生サイクルのオーダーではクリープひずみが蓄積されず損傷の影響が小さい一方で、保持応力-50 MPaの試験では、試験の経過に伴い材料は軟化し、微視組織レベルで損傷していることが示唆された。各サイクルのクリープ区間において逆遷移クリープが観測されたことは、本材料が試験を通じて軟化したことを示しており、負荷応力が引張から圧縮に転じることが転位の易動度に影響を及ぼしていることが原因として考えられる。

## 6. 参考文献

- [1]北出正司ら, 三菱重工技報, **27(6)**, 515(1990)
- [2]西元美希ら, 日本機械学会論文集, **72A**, 40(2012)
- [3]Fumiyoshi Ueno et al, *Nuclear Engineering and Design*, **162**, 85(1996)
- [4]Xiang Chen et al, *Materials Science and Engineering A*, **563**, 152(2013)
- [5]Masaya Deguchi, et al, *International Journal of Fatigue*, **54(1)**, 67-72(2015)
- [6]Tatsuya Kameyama et al, *Journal of Japan Institute of Light Materials*, **60(3)**, 111(2010)
- [7]堀内良ら, 日本金属学会誌, **35**, 406(1971)