

自動車、エネルギー機器および電子デバイスなど、さまざまな分野で高温部での熱疲労問題が重要課題になっている。熱疲労は温度や応力条件によって、その破壊メカニズムが変化する複雑な疲労現象である。たとえば中低温域では通常の高サイクル疲労、熱応力が大きくなると低サイクル疲労が問題になり、材料の非弾性挙動が支配的となる繰返し数依存型の強度特性を示す。また高温になると、高サイクルおよび低サイクル疲労とも高温酸化および材料の組織変化の影響を受けるようになり、さらにその材料の融点（絶対温度）の約40%以上になるとクリープと呼ばれる時間依存性の強度特性が現れ、疲労とクリープの相互作用が生じる。そのため、熱疲労設計には、疲労、クリープ、材料の組織変化および高温腐食など幅広いデータベースが要求される。

自動車の排気系部品の熱疲労設計においては、排気ガス温度が1000°Cにも達するといわれていることから、使用材のクリープや高温低サイクル疲労といった材料高温特性が取得されてきた。欧米では、実動パターン条件下での熱サイクル疲労試験による実用化判定がなされているようである。また当社では、実部品の肉厚相当の薄板材での熱疲労寿命取得を目的として新しい熱疲労試験方法を開発した^{*1)}。これらは熱疲労寿命予測のために不可欠なデータであるが、同時に高温稼働中に部品に発生する熱応力やひずみを計測することも重要である。その手段として、画像関連などの計測技術を適用した実機での計測も一部実施されているようであるが、現状、有限要素法をもちいた数値解析が適用されることが多い。精度のよい予測のためには、部品が経験する温度域によるクリープや非弾性挙動の発生、応力-ひずみ挙動（ヒステリシスループ）を適切に再現できる数値解析用材料モデルが望まれている。そこで筆者らは、大野ら^{*2)}による繰返し塑性モデルに着目し、オーステナイト系ステンレス鋼を対象として熱疲労下における材料応答を再現できるモデル開発に取り組んだ。

その結果、熱弾塑性およびクリープを考慮した非線形移動硬化モデルによって材料挙動を精度よく再現できた。本稿では、同手法による材料モデル化と実構造物の熱疲労寿命を予測した事例について紹介する。



技術本部
機械・プロセスソリューション事業部
プロセス技術部
なかもと ひさし
中本 久志

D-1 高温繰返し材料特性取得試験

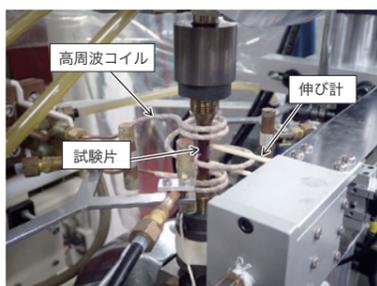
高温状態で繰返し負荷を受ける場合の材料挙動を数値解析で再現するために、一定温度および温度変動環境での材料応答（応力-ひずみヒステリシスループ）を疲労試験によって取得した。ここでは、自動車用排気系部品やガスタービンなどの部材として使用されるオーステナイト系ステンレス鋼（SUS316）を取り上げる。供試材は、SUS316円柱素材を1080°C条件で溶体化処理した。

疲労試験では高周波誘導加熱式電気油圧サーボ試験機（容量±100kN）をもちい、第1図に示すように丸棒試験片の並行部に設置した伸び計で所定のひずみ量を計測して、繰返し制御負荷し

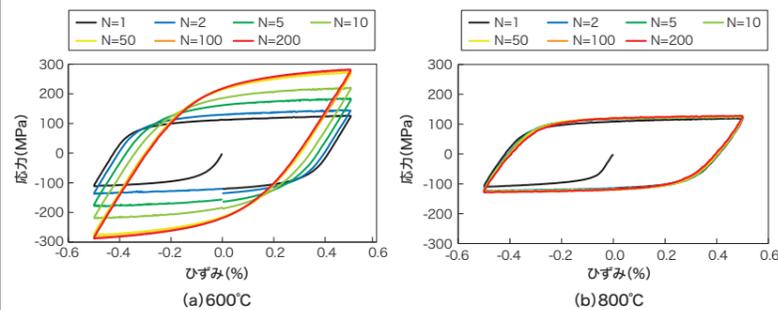
た。温度Tは200°Cから900°Cの範囲とし、試験時のひずみ量を全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_i=1.0\%$ として、それぞれ繰返し数Nが200サイクルまで負荷した。なお、本疲労試験におけるひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は0.01%/secを基本条件としたが、SUS316の材料応答に著しい時間依存性が出現する600°C以上では異なる速度でも試験を実施した。

試験結果の一例として、600°Cおよび800°Cの等温疲労試験（ひずみ速度0.01%/sec）で取得された、N=1, 2, 5, 10, 50, 100および200での応力-ひずみヒステリシスループを第2図に示す。

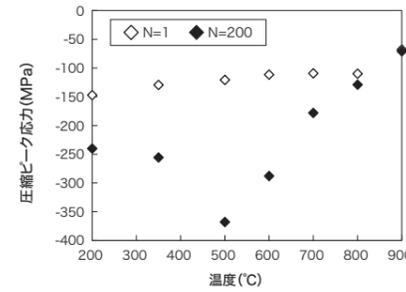
第1図 丸棒をもちいた高温疲労試験状況



第2図 等温疲労試験における代表サイクルでの応力-ひずみヒステリシスループ（ひずみ速度0.01%/sec）



第3図 各等温疲労試験におけるN=1および200での圧縮ピーク応力（ひずみ速度0.01%/sec）



これより、600°C環境では負荷の繰返しによる材料の硬化が認められた。一方、800°C環境ではN=1を除きほぼ同様なヒステリシスループであった。第3図は、等温疲労試験での各温度における繰返し硬化の度合いを、N=1と200での最大圧縮応力で示したものである。SUS316は温度によって繰返し硬化の程度が大きく異なり、とくに500°C付近で顕著であることがわかった。

熱疲労試験では、最低温度 T_{min} を200°C、最高温度 T_{max} を800°Cと設定し、 T_{min} から T_{max} までの加熱を2分、 T_{max} から T_{min} までの冷却を4分とし、 T_{max} で2分の温度保持を設けた。負荷ひず

D-2 等温疲労の繰返し塑性モデル

本稿で検討する材料モデルでは、ひずみの非弾性成分 ϵ_{in} を、温度環境によって速度非依存の塑性もしくは速度に依存する粘塑性ひずみと、定常クリープひずみに分離した^{*3)}。粘塑性ひずみ ϵ^{vp} は移動-等方硬化の複合型で表し、背応力 α を複数の項に分解して^{*4)}、それらは粘塑性ひずみ履歴に依存するとした^{*5)}。また、定常クリープひずみ ϵ^c は以下の式で算出した。

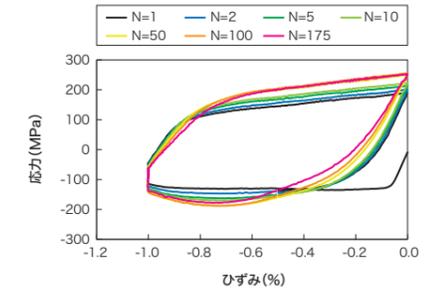
$$\dot{\epsilon}^c = \dot{\epsilon}_{c0} \left| \frac{\sigma}{\sigma_{c1}(T)} \right|^{m_{c1}(T)-1} \frac{\sigma}{\sigma_{c1}(T)}, \quad T \geq T_{lowc} \quad (1)$$

- ここに、 $\dot{\epsilon}^c$: クリープひずみ速度
- σ : 応力
- $\dot{\epsilon}_{c0}$: 参照定常クリープ速度
- $\sigma_{c1}(T)$: 定常クリープ抗応力
- $m_{c1}(T)$: 定常クリープ応力指数
- T_{lowc} : 定常クリープの下限温度

なお、(1)式は単軸形で記載しており、クリープ指数等の材料定数は疲労試験での高温保持中の応力緩和挙動から導出した^{*6)}。

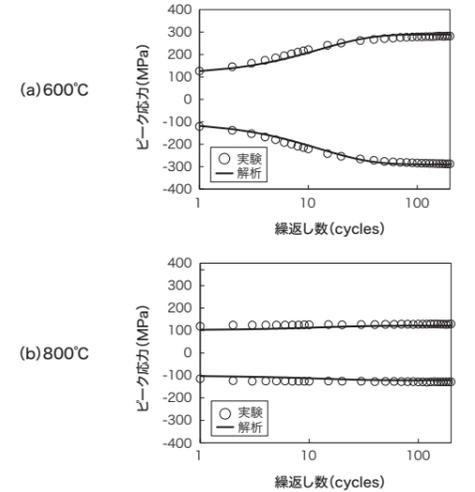
この材料モデルをもちい、まずSUS316の等温疲労試験（200°C～900°C）の再現解析をおこなった。第5図は、第1章の第2図で示した600°Cおよび800°Cの等温疲労試験（ひずみ速度0.01%/sec）の、引張および圧縮ピーク応力の推移を実験と解析で比較したものである。なお、本図の横軸は繰返し数Nであり、初期の材料特性変化が強調されるよう対数表示してある。また、600°C条件のN=1および200での応力ひずみのヒステリシスループを比較したものを第6図に示した。これらより、本モデルは材料の繰返し挙動を精度よく再現していることがわかる。

第4図 熱疲労試験における代表サイクルでの応力-機械ひずみヒステリシスループ

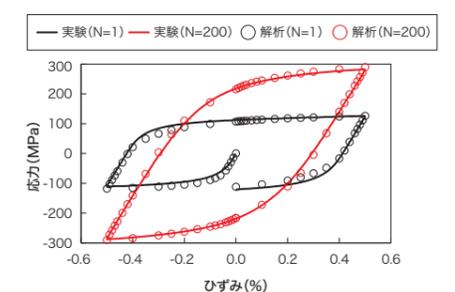


みは等温疲労試験と同等で、機械ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_m=1.0\%$ とした。第4図は熱疲労試験で得られた所定サイクル（N=175上限）での応力-機械ひずみヒステリシスループである。試験は高温側で圧縮応力となるout-of-phase条件であり、前述の等温疲労と同様、繰返しによってヒステリシスループは変化した。繰返し熱-機械的負荷を受ける構造体の応力ひずみを数値解析で評価するには、本章で述べたような材料応答を再現できる、繰返し負荷に対する適切な材料モデルが必要となる。

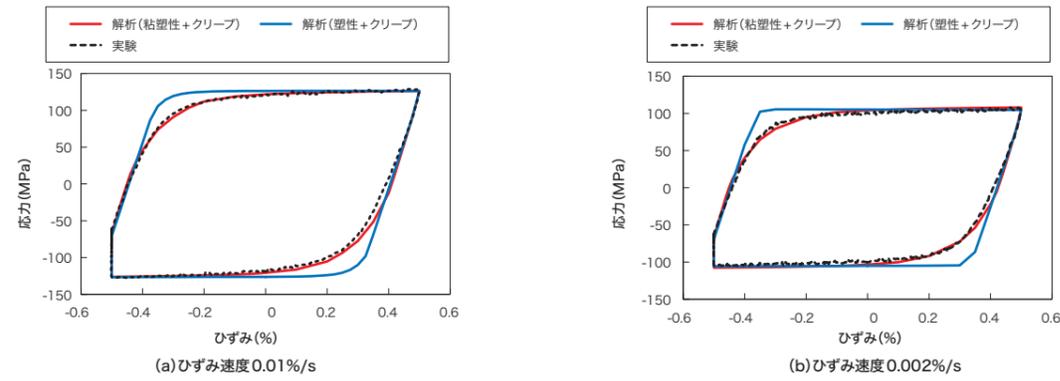
第5図 等温繰返し負荷時のピーク応力推移の比較（ひずみ速度0.01%/sec）



第6図 600°C等温繰返し負荷のN=1および200でのヒステリシスループ比較（ひずみ速度0.01%/sec）



第7図 800°C等温圧縮保持あり繰返し負荷の定常状態(実験: N=200)におけるヒステリシスループ比較; 材料モデル粘塑性有無



次に、800°C環境で圧縮保持2分の定常状態(N=200)の等温疲労をシミュレーションして、応力-ひずみのヒステリシスループを求めた。なお、ひずみ速度は0.01%/secおよび0.002%/secの2ケースであり、それらの結果を第7図に示す。材料モデルの比較のために、粘塑性を考慮しないモデル(速度非依存の塑性と定常クリープの組み合わせ)で解析したヒステリシスループも併記した。この結果、本モデルの場合は、ひずみ速度0.01%/secおよび0.002%/secの定常ヒステリシスループとも精度よく再現された。一方、粘塑性を考慮しないモデルでは、降伏挙動近辺でヒステリシスループが過度に膨らんでいることがわかる。これは、対象とす

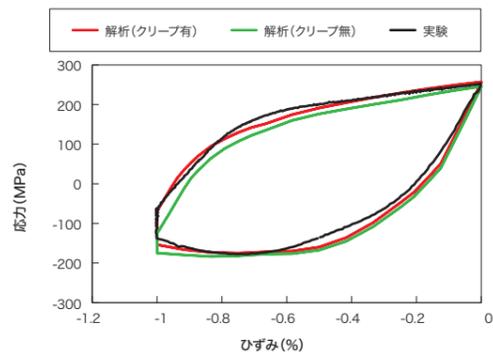
る材料変形速度依存性が定常クリープのみでは十分に再現できないことを示している。熱疲労設計において、エネルギー密度(応力-ひずみヒステリシスループの面積)を指標としてもちいる場合があるが、粘塑性を考慮することでその精度の向上が期待される。また、600°Cおよび700°C等温疲労の定常ヒステリシスループも本モデルで再現できることを確認した。したがって、速度依存の強度特性が出現すると推測される温度域(本件で対象とするSUS316では600°C以上)では、粘塑性と定常クリープに分離する本モデルが有効と考えられる。

D-3 熱疲労挙動の再現

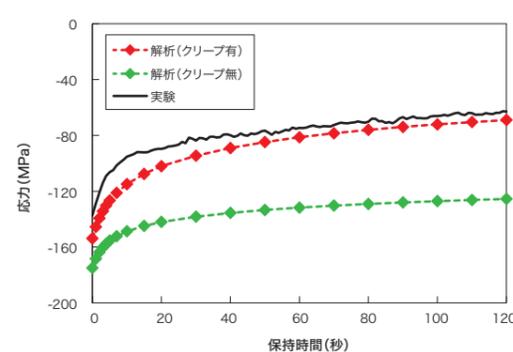
次に、第1章の熱疲労試験(T_{min}=200°C、T_{max}=800°C、昇温2分、高温保持2分、降温4分)で取得したN=175の応力-機械ひずみヒステリシスループを、第2章で述べた等温疲労をベースとした材料モデルで予測することを試みた。なお、熱疲労時の繰返し硬化挙動は、大野らの研究*2)に従い、繰返し硬化のパラメータが熱疲労試験時のT_{max}に依存するとした。第8図は熱疲労試験のシミュレーション結果である。本図には、粘塑性と定常クリープの分離型の本モデルと、定常クリープを考慮しない粘塑性のみのモデルの、二例の応力-機械的ひずみヒステリシスループを示した。

この結果、二例とも実験結果に近いが、定常クリープを考慮しない場合はT_{max}近傍で若干圧縮応力が過度に発生した。ここで、上記二例の解析ケースに関し、高温保持中の圧縮応力の推移を第9図に示す。二例とも高温保持中は応力緩和が生じているが、定常クリープを考慮するとより正確に応力緩和を予測することができた。以上のように、熱疲労ヒステリシスループの再現性は良好であり、等温疲労データをもとにした本モデルが繰返し硬化のT_{max}依存性*2)を考慮すれば熱疲労の場合にも適用できることを示した。

第8図 熱疲労負荷の定常状態(実験: N=175)におけるヒステリシスループ比較; 材料モデルクリープ有無



第9図 熱疲労負荷の定常状態(実験: N=175)の圧縮保持過程での応力緩和挙動; 材料モデルクリープ有無



D-4 実構造部品への適用

最後に、本稿で紹介した材料モデルを適用して、実構造部品の熱疲労寿命の予測を試みた。評価対象は自動車用のエキゾーストマニホールド(以降、エキマニ)であり、稼働中に過酷な温度変動を受けるために熱疲労による破壊が懸念される部品である。温度サイクルは、第3章の熱疲労試験条件と同様にT_{min}=200°C、T_{max}=800°Cとし、板厚方向の温度差はなく全ての部位が均一に温度変化すると仮定して、このような温度サイクルを5回付与した。なお、配管が4本接するフランジの裏面を全並進方向固定とした。

第10図は、5サイクル付与後の非弾性(粘塑性+クリープ)ひずみの累積コンターである。これより、4本の配管のフランジとの付け根付近が高ひずみとなっていることがわかる。その高ひずみ部位近傍で、第10図の矢印に示すようなフランジ側および配管側の評価位置を選定し、それぞれ5サイクル分の応力-非弾性ひずみのヒステリシスループを描いたものを第11図に示す。本図の縦軸の応力はMISES相当応力に、評価部の最大と最小主応力の絶対値を比較し、便宜上最大主応力の方が大きい場合を正、小さい場合を負とする符号を付した。なお、本解析では実モデルでの計算の取束性を高めるために、結果に影響をおよぼさない範囲で繰返し硬化に関する材料パラメータを調整した。これより、評価部位によって応力と温度の位相が異なっており、フランジ側では既述のout-of-phaseであるのに対し、配管側では高温で引張応力となるin-phaseモードであることが確認された。各評価部位の疲労寿命を予測するために、取得したヒステリシスループから非弾性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{in}$ を計算すると、以下となった。

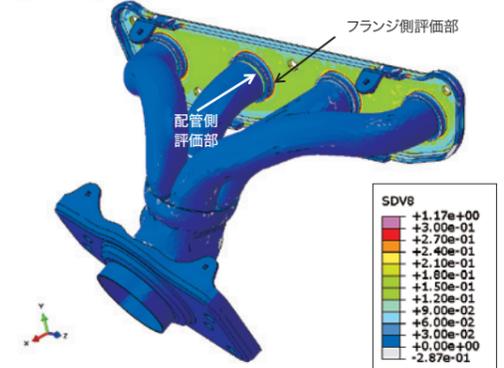
付け根部フランジ側	$\Delta\epsilon_{in}=2.90(\%)$
付け根部配管側	$\Delta\epsilon_{in}=2.00(\%)$

熱疲労寿命の予測にもちいる寿命線図は、当社で取得したSUS316の薄板屈曲熱疲労などの破損繰返し数 N_f を参考に*1)、以下のように乗累型近似して設定した。ちなみに、薄板屈曲熱疲労の破損繰返し数は、out-of-phaseとin-phaseモードで平均化されたものである。

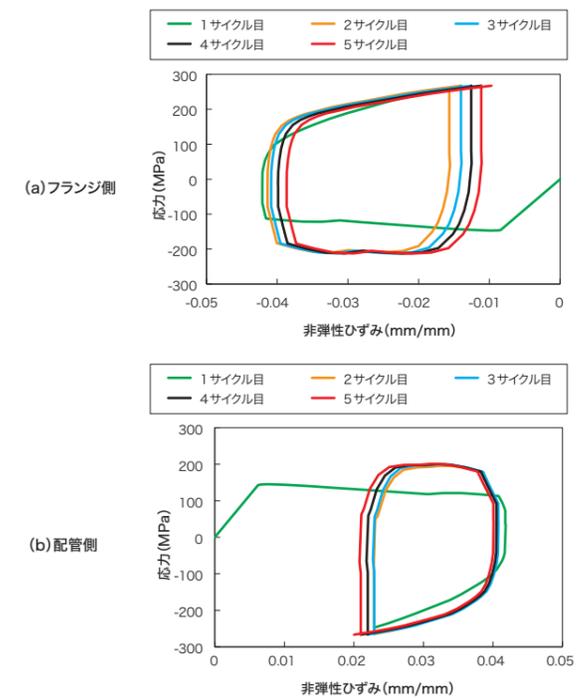
$$\Delta\epsilon_{in}=8136.8 \times N_f^{-1.352} \quad (2)$$

結果、各評価部位の非弾性ひずみ範囲と(2)式の寿命線図から、付け根部フランジ側では355回、同配管側では467回の疲労寿命と算定された。

第10図 熱サイクル5回付与後のエキマニ累積非弾性ひずみコンター(単位: mm/mm)



第11図 エキマニ高ひずみ部位の応力-非弾性ひずみヒステリシスループ



自動車用のエキマニのように繰返し熱-機械的負荷を受ける耐熱部品では、熱疲労による材料破損が問題となる。この材料破損を防ぐために、設計段階や保証試験結果の検証で数値解析を援用して破損繰返し数を予測、検討することがあり、適切な材料モデルをもちいて数値解析を実施する必要がある。本稿で述べた繰返し塑性材料モデルは、その解析用材料モデルとして使用が期待できるものである。最後に、名古屋産業科学研究所 首席研究員大野信忠氏(名古屋大学名誉教授)にはモデル化手法の細部にわたりご教授賜りました。この場をかりて御礼申し上げます。

参考文献 *1) 浅田泰史ほか:こべるにくす, Vol.24(2015), No.44, p.1
 *2) N. Ohno et al.:Key. Eng. Mater., Vol.725(2017), p.275
 *3) 山寄優ほか:日本機械学会論文集, Vol.81(2015), No.821, Paper No. 14-00382
 *4) J.L. Chaboche:Int. J. Plast., Vol.5(1989), p.247
 *5) N. Ohno et al.:Int. J. Plast., Vol.9(1993), p.375
 *6) 谷村利伸ほか:エレクトロニクス実装学会誌, Vol.10(2007), No.1, p.52