

A

自動車用排気系部材の熱疲労特性評価 ～簡便熱疲労試験方法の検討～

自動車エンジンから排出されるガス温度は、燃費向上やダウンサイジング化にともなって近年高温になっており車種によっては1000℃にも達するといわれている。そのためエキゾーストマニホールド(以下エキマニ)等の排気系部材には運転中に過酷な温度サイクルが繰り返され、熱疲労特性に優れた材料選定がカーメーカーにとって重要課題の一つになっている。一般に材料の熱疲労特性評価は、高周波誘導加熱式の軸力熱疲労試験機により丸棒試験片を用いて実施されている^{*1)}。近年、エキマニは2mm前後の薄板から製造されることが多くなり、それにとまって平板や薄肉円筒での試験の要求が多くなっているが、薄板材での軸力熱疲労試験では座屈が発生しやすく、また伸び計先端の押し当て痕の影響などのため、正確な寿命評価が困難である。

そこで筆者らは、Santacreuら^{*2)}の提唱している薄板屈曲板を用いた完全拘束型熱疲労試験が比較的簡単な試験方法であり、かつ座屈問題も起きにくい点に着目し、この方法に機械的負荷を重畳させる新しい熱疲労試験方法を提案し、耐熱鋼板の熱疲労寿命を求めた。さらに有限要素法(以下FEM)による熱疲労試験中に発生する応力-ひずみ解析から、材料の熱疲労寿命線図を推定する方法についても検討したので以下に紹介する。



技術本部
機械・プロセスソリューション事業部
強度技術部
材料実験技術室
あさひ やすふみ
浅田 泰史



技術本部
機械・プロセスソリューション事業部
CAE・実験評価部
解析技術室
なかもと ひさし
中本 久志

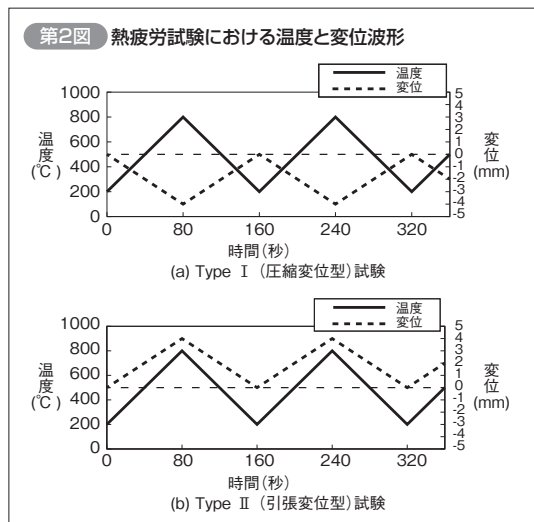
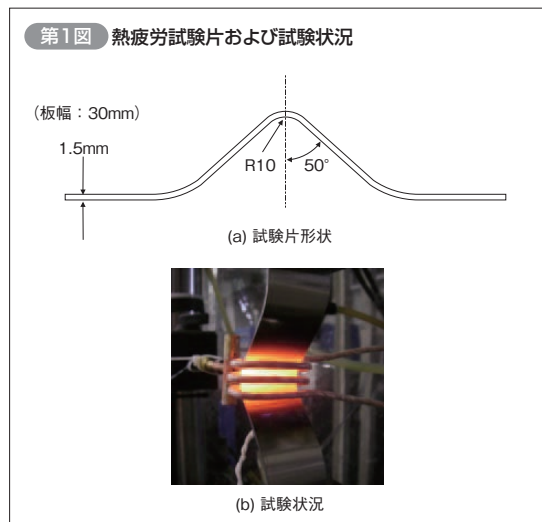
A-1 屈曲薄板試験片を用いた新しい熱疲労試験方法

供試材としてエキマニにも使用されている板厚1.5mmのSUS316鋼(0.04%C-16.8%Cr-10%Ni-2.1%Mo)を使用した。この鋼板から第1図に示すように長さ170mm、幅30mmの長方形平板を切り出し、その後、屈曲部の内半径が10mmとなるように冷間加工により屈曲試験片を作製し、以下の熱疲労試験に供した。

熱疲労試験は、高周波誘導加熱式電気油圧サーボ試験機(容量±100kN)を用いて、第2図に示すように屈曲部頂点の最低および最高温度がそれぞれ200℃および800℃、加熱・冷却速度が7.5℃/sec(1周期160sec)となるように制御し、これと同期して最低温度位置からの変位が圧縮側となるType I試験(圧縮変位型試験)

と、同変位が引張側となるType II試験(引張変位型試験)を実施した。第1表に試験条件を示す。

熱疲労試験に先立ち、荷重ゼロ状態で200～800℃熱サイクルにおける試験片各部の温度履歴を計測し、試験片幅方向にはほぼ一様で、試験片長手方向には屈曲部頂点を挟んでほぼ対称な温度分布になることを確認した。また、熱サイクルにともなう試験片長手方向の自由膨張変位幅(ΔV_{th})を事前に計測しておき、Type I型熱疲労試験では機械的変位幅(ΔV_{mech})が-4mm(圧縮側)、Type II型試験ではΔV_{mech}=+4mm(引張側)となるように、第1表に示す見かけの変位幅(ΔV_a=ΔV_{th}+ΔV_{mech})を試験片に付与した。



参考文献

- *1) ISO 12111, Metallic materials - Fatigue Testing= Strain-controlled thermomechanical fatigue testing method (2011)
- *2) P.A. Santacreu 他, SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. 5(2), (2012), pp.904-910

第1表 試験条件と試験結果

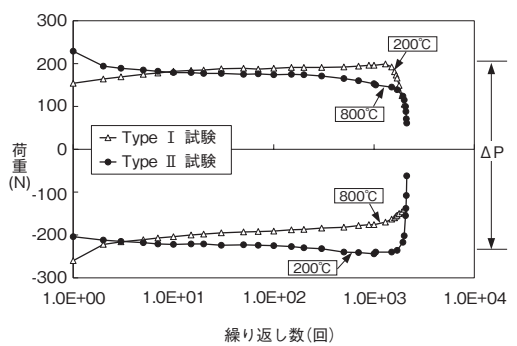
材料	TPNo.	Test type	方向	見かけの変位幅 ΔVa (mm)	破損寿命 (回)	最大荷重 P_{max} (kN)	最小荷重 P_{min} (kN)	荷重範囲 ΔP (kN)
SUS316	#1	I	圧縮	-3.7	1780	0.20	-0.18	0.38
	#2	II	引張	+4.5	1962	0.17	-0.27	0.44
	#3	II	引張	+4.5	2080	0.15	-0.24	0.39

(注) 荷重値は破損寿命の1/2の繰り返し数における値

A-2 熱疲労試験結果

第3図に Type I および Type II 試験の繰り返しにともなうピーク荷重の変化を示した。繰り返しとともに1サイクル中の平均荷重が Type I 試験では引張荷重方向に、Type II 試験では圧縮荷重方向に若干シフトしていくが、荷重範囲 ΔP は寿命に至る大半の期間でほぼ一定であり、破断付近で急速に減少している。破損寿命 N_f は、軸力の熱疲労試験と同様の手法で、引張側の最大荷重がその定常値から25%低下した繰り返し数をもって定義し、その結果を前記の第1表中に示した。Type II 試験を同一条件で2回実施したが、 N_f が1962回と2080回となり、一般的な軸力熱疲労試験^{*3)}と同等の再現性のある試験であることが確認できた。また、Type I 試験の破損寿命は1780回と、Type II 試験に比べて短いことがわかった。

第3図 繰り返しにともなうピーク荷重の変化



破断後の試験片屈曲部の状況と破面の外観写真を第4図に示すが、破線で示す最終破断時の両面からのき裂の合体線を挟んで、破面の特徴が大きく異なっていることがわかる。Type I 試験においては試験片屈曲点部の凸側において、Type II 試験においては同部凹側においてき裂進展領域が大きく、またこの部位の破面の凹凸の程度が大きいことがわかる。

第5図に破断部付近の板幅中央断面のマクロ組織写真(破断片の片方のみ)を示すが、本写真からも Type I 試験では凸側表面において、Type II 試験では凹側表面において多数のき裂が先行して発生していることがわかる。

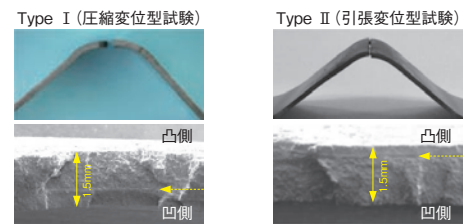
第6図のミクロ組織写真に示すように Type II 試験では凹部側の表面き裂の先端よりも板厚の内部にも、多数の粒界ポイドや粒界き裂が観察される。一方、Type I 試験では写真は省略するが逆に凸部側においてまったく同様の状況が認められた。

第7図に Type II 試験の破面の走査型電子顕微鏡写真を示す。マクロ破面で凹凸が大きく観察された屈

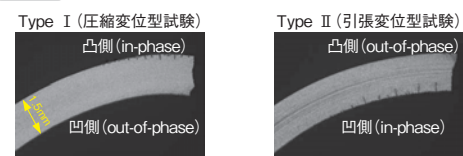
曲部凹部側においては大部分の領域がクリープの影響を示す粒界破面を呈しており、一方凸部側破面には純粋な疲労破壊に特有のストライエーションが明瞭に観察された。

後述の FEM 解析結果からわかるように Type I 試験では屈曲部の凸部側が in-phase 型(高温側で引張応力となる)熱疲労条件になっており、一方凹部側ではその反対の out-of-phase 型(高温側で圧縮応力となる)の条件となっている。Type II 試験では表裏で Type I 試験と逆位相となる。一般にオーステナイト系ステンレス鋼において in-phase 型の熱疲労条件では主に粒界破壊となり、out-of-phase 型条件では粒内ストライエーション破壊となることが知られており^{*3)}、屈曲試験片を用いる

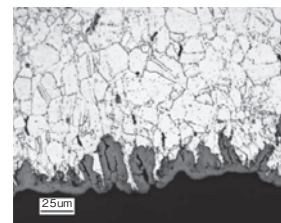
第4図 破断後の試験片および破面外観写真



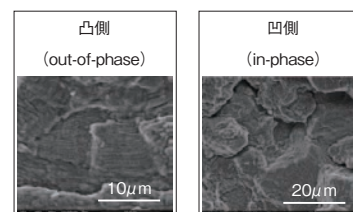
第5図 破断部近傍の断面マクロ写真



第6図 凹部側の表面き裂と内部粒界ポイドおよび粒界き裂 (Type II 試験)



第7図 破面SEM写真 (Type II 試験)



参考文献

- *3) 新田明人:博士論文(1993)

本熱疲労試験は、両方の損傷が試験片の表裏で同時に進行する場合の寿命を評価していることになるといえる。したがって軸力で得られる熱疲労寿命とはおのずから異なると考えられる。しかし、破面観察等の手段によって表裏のき裂発生・進展挙動をそれぞれ別個に評

価することによって、逆に一つの試験片でin-phase条件とout-of-phase条件の両方の熱疲労寿命線図が同時に得られるという利点がある。この方法については紙面に制約があるので関連論文^{*4)}を参照されたい。

参考文献

*4) 横幕俊典ほか:第52回高温強度シンポジウム,日本材料学会(2014.12), pp.30-34

A-3 屈曲試験片破断部における応力-ひずみ挙動のFEM解析

丸棒試験片を用いる軸力熱疲労試験においては標点部のひずみを伸び計にて計測するため、ひずみ範囲を種々に変えた試験を実施することによって熱疲労寿命線図(ひずみ範囲-寿命線図)を直接的に求めることができる。また、計測荷重を試験片初期断面積で除することにより公称応力も簡単に評価できる。しかし、屈曲試験片を用いる本熱疲労試験では試験片全体に付与される変位と荷重は計測するが、屈曲部の両面のひずみの計測は非常に困難であり、応力についても軸応力と曲げ応力が発生するため肉厚方向に一樣な分布とはならない。そのため実験のみでは、寿命は求められても、ひずみや応力をパラメータとする熱疲労寿命線図は得ることができない。そのためここでは応力とひずみについてはFEMによる数値計算で推定することにした。

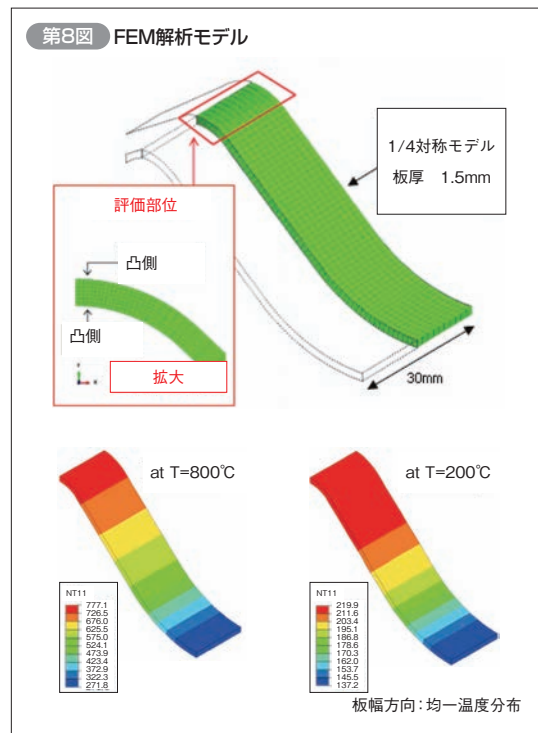
まず、代表の試験片を用いて熱サイクル中の試験片各部の温度分布とその履歴を実測し、各時刻において試験片の板幅方向にはほぼ一樣で、長手方向には屈曲部頂点を境界としてはほぼ対称な温度分布となることを確認した。この実測温度分布を用いてSUS316製試験片の熱伝導解析および熱弾塑性応力解析を実施した。

第8図にFEM解析モデルを示す。要素には6面体一次の低減積分ソリッド要素を使用した。板厚方向には全領域7分割し、長手方向には屈曲部近傍において分割を細かくして最小要素寸法としては $0.23\text{mm}^L \times 1.5\text{mm}^W \times 0.21\text{mm}^H$ とした。要素数は5040、節点数は6424である。

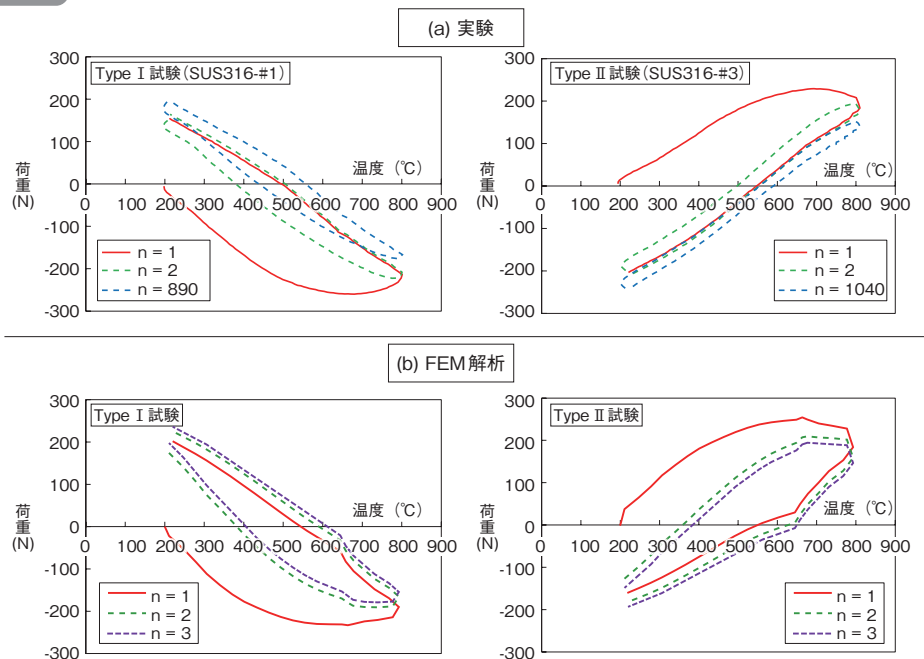
材料の弾塑性構成式としてはSUS316製丸棒の室温から 800°C における種々の温度における繰り返し応力-ひずみ特性から定義し、硬化則には非線形移動硬化則を用いた。熱膨張率についても同温度範囲における特性を用いた。荷重条件としては、第2図に示したように温度サイクルに同期して強制的な変位を3サイクル付与した。

第9図(a)に熱疲労試験開始直後の1, 2サイクルおよび破損繰り返し数の約1/2の繰り返し数における実測の温度-荷重線図を示す。Type I試験では、高温側で圧縮荷重、低温側で引張荷重が発生し、繰り返しとともに温度-荷重線図が引張荷重側に若干シフトしていくことがわかる。

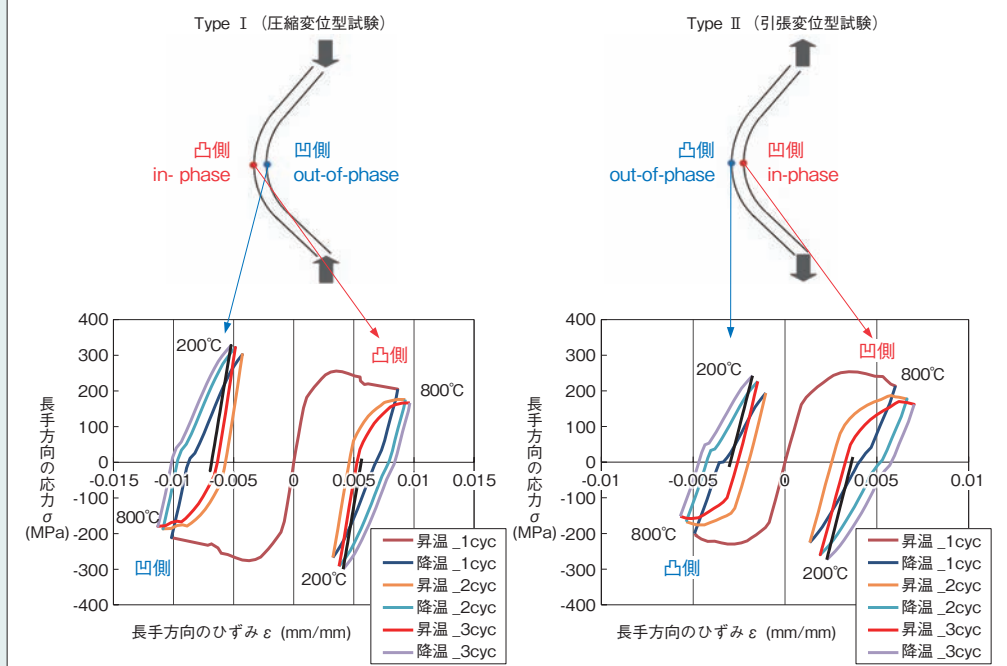
一方、Type II試験では、Type Iと逆に高温側で引張荷重、低温側で圧縮荷重となり、繰り返しとともに圧縮側に若干シフトしている。同図(b)はFEM解析の結果であるが、温度サイクル中の荷重履歴挙動および平均荷重のシフト状況がおおむね良好に表されており、妥当なシミュ



第9図 繰り返しとともに荷重-温度線図の変化



第10図 屈曲部両面の長手方向に発生する応力とひずみの履歴



レーション結果が得られたと判断される。

そこで次に試験片屈曲部の両面に発生している応力ひずみ履歴をFEM解析により求め、第10図に示した。本図は屈曲部の両表面における長手方向の応力とひずみを3サイクル分連続してプロットしたものである。図中にはサイクル中の最低温度(200℃)と最高温度(800℃)発生点も合わせて示した。本図から、Type I試験では屈曲部の凸部側が高温側で引張応力となるin-phase条件となっており、凹部側が高温側で圧縮応力となるout-of-phase条件となっていることがわかる。

Type II試験ではこれとは逆の位相となっている。また、いずれのタイプの試験においてもin-phase条件となる側では繰り返しとともに平均応力が圧縮側にシフトし、ひずみは引張側にラチェットするのに対し、out-of-phase条件となる側では応力は逆に引張側にシフトし、ひずみは圧縮側にラチェットすることが明らかになった(注:ラチェットとは一方向に漸進的にひずみや変形が進行することである)。別途報告した20サイクルの履歴解析^{*4)}からこのラチェットひずみは繰り返しの初期では大きい、3サイクル程度でほぼ一定値になることから、今回のひずみ範囲(ラチェットひずみを含む塑性ひずみ範囲)は3サイクル目のヒステリシスループから求めた。

その結果、屈曲部表裏の塑性ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_p$ (ラチェットひずみ成分も含む)は以下となった。

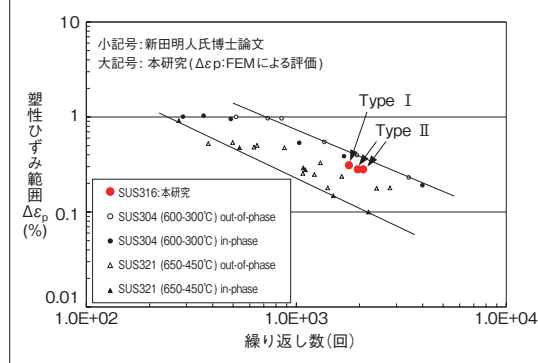
- Type I試験 : 0.31%(凸側), 0.38%(凹側)
- Type II試験 : 0.21%(凸側), 0.25%(凹側)

前項、熱疲労試験結果においてType Iの熱疲労寿命がType IIのそれよりも短くなることを述べたが、上記の解析結果に示すとおり凸部、凹部ともにType I試験において塑性ひずみ範囲が大きく発生しており、試験結果が合理的に説明された。

A-4 熱疲労寿命線図の推定

前記のとおりひずみ範囲は屈曲部表裏面で $\pm 10\%$ 程度異なっていたが、本稿では両表面の平均値をその試験片の代表ひずみ範囲と定義して第11図の熱疲労寿命線図を作成した。併せて、公表されている同種のオーステナイトステンレス鋼(SUS304およびSUS321)のin-phaseおよびout-of-phase型軸力熱疲労実験データ^{*3)}もプロットした。本試験結果と文献データでは試験温度範囲も異なっているが、一般に塑性ひずみ範囲で寿命を評価すると温度の影響は小さくなり、SUS304とSUS316の寿命差も小さくなる^{*5)}ことから、屈曲試験片を用いて得られたSUS316の熱疲労寿命線図はおおむね妥当であると考えている。

第11図 軸力熱疲労寿命線図(文献値)と本熱疲労試験結果の比較



本稿で紹介した薄板屈曲部を用いた熱疲労試験は、エキマニなどの薄板構造部材の熱疲労寿命を座屈問題もなく比較的簡便に、かつ精度よく評価できるので、実用的な材料比較試験法として大いに期待できる。加えてFEMによる応力-ひずみ解析を援用することによって材料固有のin-phaseおよびout-of-

phase条件に対する熱疲労寿命を一つの試験片で同時に推定できるのでその工学的意義も大きいと思われる。今後さらに厳密に同一材料での軸力熱疲労寿命との比較を行うとともに、異なる材料、保持時間、変位範囲条件での試験データを蓄積し、顧客の要求に応える試験技術として確立していきたい。

参考文献

*5) 例えば L.F.coffin, Met. Trans., Vol.3 (1972), p.1777