

改良SUS410Lの高温疲労寿命の研究

貝原 亨*¹・小畑清和*²・太田博光*²・上野 修*³

Study of the Elevated Temperature Fatigue Life of Modified SUS410L

Tohru Kaihara*¹, Kiyokazu Kobatake*², Hiromitsu Ohta*²
and Osamu Ueno*³

The integrity of exhaust manifolds on combustion engines has been severely affected by the cyclic thermal stresses in the engines. New alternative materials for exhaust manifolds are required for the development of high performance engines. The authors performed elevated temperature fatigue tests using alternative materials of modified SUS410L.

1 緒言

船外機付漁船・自動車等のガソリンエンジンの高性能化を図る方法として、燃焼ガス温度を更に上げることが考えられるが、その場合は、現在の排気ガス温度約750~850°Cが1050~1100°Cに上昇すると予測される。燃焼ガス温度が上昇した場合、シリンダヘッドやシリンダライナ等は、水冷却されているので問題は少ないが、燃焼ガスをシリンダから排出する排気集合管は、配置構造の制約から内部を水冷却することが難しく、発生熱応力に対する材料と形状の改良が要求される。この排気集合管は高温熱疲労サイクルによる繰返し疲労の激しい条件下にあるため、新耐熱材料で代替することを考えた場合、その材料の高温強度特性を採取す

る必要がある。

本研究は、排気集合管の代替候補材料として開発された改良SUS410Lの、高温条件下における疲労寿命についての実験研究を行い、ガソリンエンジンの性能向上に資することを目的とするものである。

2 試験

2.1 試験体

試験体は、丸棒を旋盤、NC旋盤及び万能研削盤を用いて加工した。試験体平行部直径は10mmである。試験体形状をFig. 1に示す。

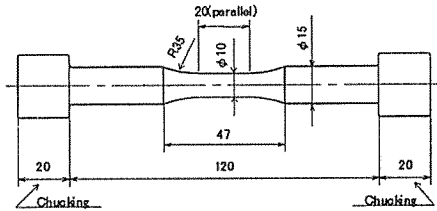


Fig. 1. Test specimen configuration (unit:mm)

2. 2 試験体材料

試験体材料には改良SUS410Lと、比較検討材料として高温構造部材として汎用されている耐熱材料SUS304を用いた。改良SUS410L・SUS410L並びにSUS304の化学成分^{1,2)}をTable 1に示す。また、改良SUS410L並びにSUS304の機械的性質³⁻⁵⁾をTable 2に示す。

2. 3 試験装置

高温疲労試験にはサーボバルサ試験機を用いた。試験機の主な仕様は次の通りである。

- 1) 最大荷重 動的±10tf, 静的±15tf
- 2) 最大ピストンストローク ±25mm
- 3) 繰返し速度 0.00001~30Hz
- 4) 振幅特性 ±2.8mm/5Hz
- 5) 制御量 荷重, ストローク, 標点間変位

- 6) 試験波形 正弦波, 三角波, 台形波
- 7) 最高使用温度 1,000°C

2. 4 試験方法

本試験材料の高温力学挙動を検討するために、負荷速度一定($\dot{\epsilon} = 10^{-4}/\text{sec}$)とし、室温から900°Cまでの間を100~150°Cきざみで引張り試験を行い、ヤング率の温度依存性を検討した。

次に、ひずみ量並びにひずみ保持時間をパラメータとした保持時間なしの三角波(以下三角波試験とよぶ)、保持時間ありの台形波(以下台形波試験とよぶ)を負荷させた試験を行った。負荷速度は $\dot{\epsilon} = 10^{-4}/\text{sec}$ 一定、保持時間は600秒間とし、負荷ひずみのパラメータは0.5・1.0・2.0%の三種類とした。また、台形波試験に振幅をパラメータとする正弦波を組み合わせた重畳波試験を行った。正弦波の振幅は制御ひずみ量の12.5%並びに25%とし、周波数を0.2Hzとした。それぞれの試験波形をFig. 2に示す。

3 試験結果

3. 1 ヤング率の温度依存性

引張り試験により得られた改良SUS410L及びSUS304の各温度におけるヤング率をFig. 3に示す。この結果より、改良SUS410LはSUS304に比べてヤング率の温度依存性の高い材質であることが分かった。

Table 1. Chemical composition of Mod. SUS410L, SUS410L and SUS304

(unit:%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al	N	Ti
Mod. SUS410L	0.006	0.49	0.24	0.024	0.007	0.09	11.06	0.01	0.008	0.006	0.188
SUS410L	~0.03	~1.00	~1.00	~0.04	~0.03	-	11.0~13.5	-	-	-	-
SUS304	~0.08	~1.00	~2.00	~0.045	~0.030	8.0~10.5	18.0~20.0	-	-	-	-

Table 2. Mechanical properties of Mod. SUS410L and SUS304

Material	Proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	(at room temperature)	
				Thermal expansion coefficient (1/°C)	Hv
Mod. SUS410L	304	451	31	11.7×10 ⁻⁶	140
SUS304	242	666	68	12.2×10 ⁻⁶	150

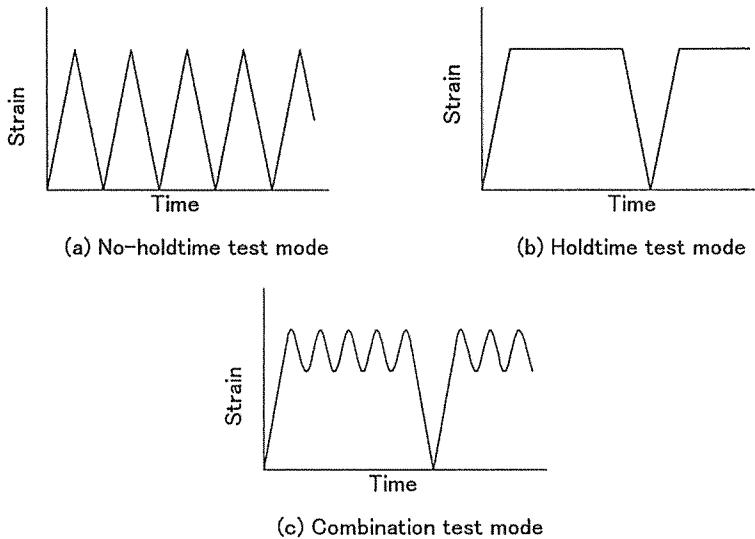


Fig. 2. Fatigue test modes

3.2 三角波疲労試験について

三角波試験より得られた結果から、ひずみ量と破断回数の関係をプロットするとFig. 4のようになる。ここでFig. 4におけるSUS304のデータは文献⁶⁾のデータを引用し、破断回数について著者らの試験データと比較検討した。この図より、今回の研究に用いた改良SUS410Lは、疲労寿命がSUS304に対して数倍高いことが分かった。

3.3 台形波疲労試験について

改良SUS410Lについて、台形波と三角波の破断回数の比較を行った。結果をFig. 5に示す。ここで、ひずみ制御量が2%の時、三角波よりも台形波の破断回数が大きくなっているが、この点については更にデータを積み重ねて検討する必要がある。

3.4 重畳波疲労試験について

試験結果をFig. 6に示す。この図において縦軸は最

大ひずみ量，横軸は正弦波を有する一つの台形波を1サイクルとした。これより，重畳波の振幅が大きくなるほど，疲労寿命が低下することが分かった。

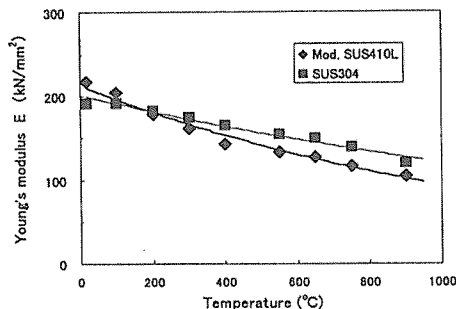


Fig. 3. Relationship between Young's modulus and temperature

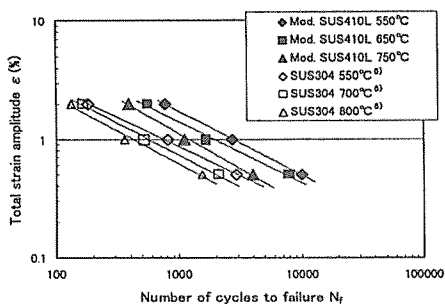


Fig. 4. Strain vs. rupture cycles at no-holdtime test

4 検討

4.1 マニホールドに発生する熱応力計算式

マニホールドに改良SUS410Lを使用することを想定するにあたって，あるマニホールドを例に取り，最高温度が測定されている(*)の部分⁷⁾に発生する熱応力を概算で求めた。検討するマニホールドの形状・排気ガス温度及び，表面温度をそれぞれTable 3, Fig. 7に示す。これらから，(*)の部分における軸方向，

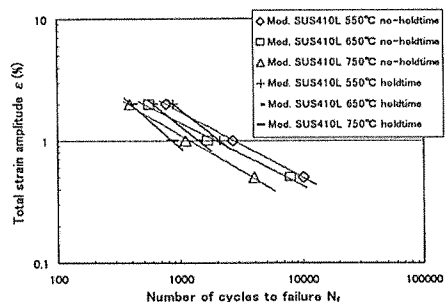


Fig. 5. Comparison between no-holdtime test and holdtime test of Mod. SUS410L

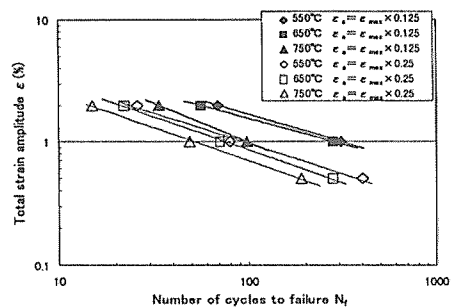


Fig. 6. Strain vs. rupture cycles at combination test of Mod. SUS410L

半径方向の弾性熱応力を，それぞれ単純円筒の熱応力計算式(1)，(2)⁸⁾を用いて算出した。この式において，応力 σ (N/mm²)，熱膨張係数 α (°C⁻¹)，ヤング率E (N/mm²)，温度 t (°C)，長さ l (mm)及びポアソン比 ν (≈ 0.3)とする。ヤング率は，平均温度に相当するものをFig. 3より求め用いた。計算結果をTable 4に示す。

$$\sigma = -\frac{\alpha E \Delta t}{l + \alpha \Delta t} \approx -\alpha E \Delta t \quad \dots\dots (1)$$

$$\sigma = \frac{\alpha E \Delta t}{2(1-\nu)} \approx 0.715 \alpha E \Delta t \quad \dots\dots (2)$$

Table 3. Dimension of exhaust manifold and exhaust gas temperature

Flange length (mm)	Interval of port (mm)	Thickness (mm)	Exhaust gas temperature (°C)
310	80	1.0	1050

4.2 マニホールドの疲労強度

Fig. 4 より得られる改良SUS410L及びSUS304の三角波疲労試験の平均直線と、Fig. 3 のヤング率Eよりみかけの弾性応力を換算しFig. 8を求めた。そして、Tabl 4 の計算結果を用い、Fig. 8 の矢印に示す方法で発生熱応力に対する改良SUS410L, SUS304の疲労寿命を求めた。結果をTable 5 に示す。これより、今回の研究に用いた改良SUS410LはSUS304よりも疲労強度が高く、実用性の高い材質であることが分かる。

4.3 重畳波形の影響

正弦波を負荷した、重畳波試験による破断回数への影響を調べる為、重畳波形をFig. 9のような二段多重波形とし、マイナー則^{9,10)}を用いて評価した。マイナー則をEq. (3)に示す。ここで $\epsilon_1 \dots \epsilon_n$ を重畳波試験の中のひずみ量としたとき、 $n_1 \dots n_n$ は重畳波試験の中に $\epsilon_1 \dots \epsilon_n$ が現れる破断までの全繰返し数、 $N_1 \dots N_n$ は三角波試験のひずみ量 $\epsilon_1 \dots \epsilon_n$ に対する破断繰返し数、Dは疲労損傷度である。マイナー則はD=1に達するときに寿命であるとする考え方であり、結果をFig.10に示す。これよりDの値が約0.9~2.2であることから、マイナー則は本研究に用いた重畳波試験について、適当な寿命予測法の一つであることがわかった。

$$\sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \leq D \quad \dots \dots (3)$$

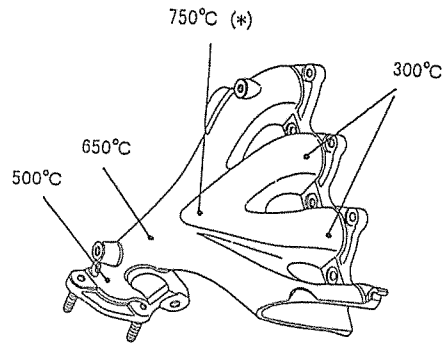


Fig. 7. Surface temperature at exhaust manifold

Table 4. Results of thermal stress

	Axial direction	Radial direction
Thermal stress (N/mm ²)	760.61	269.75

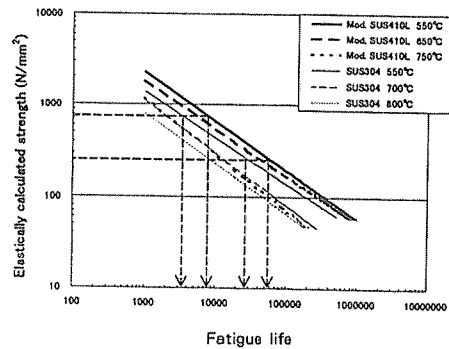


Fig. 8. Elastically calculated strength vs. fatigue life at no-holdtime test

Table 5. Results of fatigue life

	Temperature (°C)	Fatigue life	
		Axial direction	Radial direction
Mod. SUS410L	550	7900	55200
	650	5050	42600
	750	2000	12500
SUS340	550	3200	26100
	700	1900	13100
	800	1100	7950

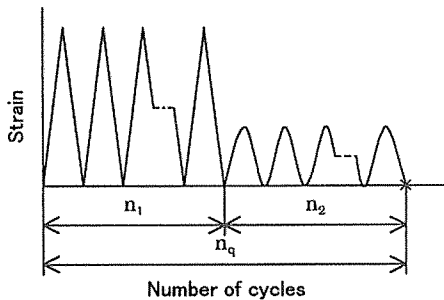


Fig. 9. Fatigue test mode for Miner's law

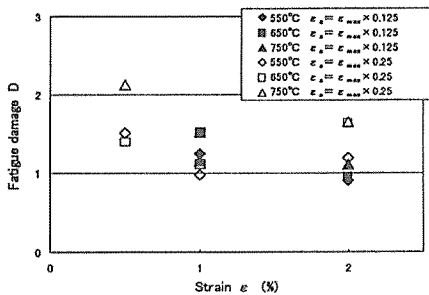


Fig. 10. Application of Miner's law

5 まとめ

三角波、台形波及び重畳波の高温疲労試験を行い、それらからデータ点は少数であるが、疲労寿命の平均直線を求めた。その結果、改良SUS410Lの疲労寿命回数は、SUS304よりも大きく、実用性の高い材質であることが分かった。また、応力振幅が変動する場合の

疲労寿命予測には、マイナー則が適用できる見通しを得た。

今後はひずみ量、周波数等のパラメータを更に変化させてデータを積み重ね、疲労設計に資することにした。

謝 辞

本研究は、マツダ株式会社殿からの研究委託で実施中のものであり、試験体材料の提供と丁寧なアドバイスをいただいた、同社技術研究所武重伸秀氏に深甚の謝意を表す。

また、実験の遂行及びデータ整理に協力していただいた、水産大学校海洋機械工学科学生の濱崎千枝さん、八木典子さんに感謝の意を表す。

文 献

- 1) 日本機械学会, 機械工学便覧 B4 材料学・工業材料, 1990, pp.48-50.
- 2) 日本規格協会, JISハンドブック 1998 鉄鋼 I, 1998, pp.539-541.
- 3) 金属材料技術研究所, 熱間圧延ステンレス鋼板SUS304-PP.(18Cr-8Ni)の高温時間依存低サイクル疲れ特性データシート, No.49, 1995, pp.2-3.
- 4) 日本機械学会, 技術資料 金属材料の弾性係数, 1996, p.95, p.99.

- 5) 日本規格協会, JISハンドブック 1998 鉄鋼Ⅱ, 1998, p.434.
- 6) 日本機械学会, 金属材料 疲労強度の設計資料 (Ⅳ) 低サイクル疲労強度, 1996, pp.98-100.
- 7) マツダ株式会社 技術研究所資料, 1999.
- 8) 日本機械学会, 機械工学便覧 A4 材料力学, 1990, pp.9-10, p.74.
- 9) 日本機械学会, 機械工学便覧 A4 材料力学, 1990, p.122.
- 10) 中沢一・本間寛臣, 金属の疲労強度, 養賢堂, 1982, pp.55-61.