

高温疲労特性および熱疲労特性に優れた 自動車排気系用フェライト系ステンレス鋼*

川崎製鉄技報
30 (1998) 2, 99-103

Ferritic Stainless Steels with Good High Temperature Fatigue and Thermal Fatigue Properties for Automobile Exhaust Gas Systems



宮崎 淳

Atsushi Miyazaki

技術研究所 ステンレス鋼研究部門 主任研究員 (掛長)



石井 和秀

Kazuhide Ishii

技術研究所 ステンレス鋼研究部門 主任研究員 (課長)



佐藤 進

Susumu Satoh

技術研究所 ステンレス鋼研究部門長・工博研究員

要旨

フェライト系ステンレス鋼の 600°C と 800°C での高温疲労特性および 100-800°C の熱疲労特性を調査し、以下の知見を得た。(1) 高温疲労特性は、シェンク式高温平面曲げ疲労試験によって評価し、 $R409L < R429EX = R430LNM < R434LN2$ の順に後者ほど優れた寿命を示した。この結果は、高温疲労試験と同じ温度および同じ歪み速度における高温強度の序列に対応した。(2) 熱疲労寿命は、拘束率に強く依存した。実際の排気系環境相当と考えられる低拘束率条件では、 $R429EX$ 、 $R430LNM$ および $R434LN2$ が $R409L$ より優れた寿命を示した。低拘束率条件での寿命は強度律速であり、室温から高温まで高強度である材料が熱疲労寿命に有利であると考えられる。

Synopsis:

The properties of high temperature fatigue and thermal fatigue of ferritic stainless steels have been investigated. The results obtained are as follows: (1) $R429EX$, $R430LNM$ and $R434LN2$ were increasingly superior in the order of listing in high temperature fatigue property to the conventional steel ($R409L$). This order corresponded to the order in the strength of these steels at the same temperature and the same strain rate in high temperature fatigue tests. (2) Number of cycles to failure in thermal fatigue tests depended on restraint ratio. The fatigue life of $R429EX$, $R430LNM$ and $R434LN2$ was longer than that of the conventional steel ($R409L$) in the condition of low restraint ratio which was considered to correspond to that in automobile exhaust gas systems.

1 緒 言

近年、地球環境問題が注目され、自動車の排ガス浄化が精力的に検討されている。各種の方法の中で、排ガス温度の上昇は、触媒での立ち上がり浄化率を向上できるため、有効な手法の一つと考えられている。現在、自動車の排ガス部品（エキゾーストマニフォールド、フロントパイプ、コンバーターシェルなど）の多くは $SUH409$ ($11Cr-Ti$) 製であるが、今後排ガス温度が上昇した場合、より優れた耐熱性を有する材料のニーズが増大すると考えられる。このような自動車排ガス部品に必要とされる耐熱性としては、第一に、耐酸化性が上げられる。これについてはすでに多くの報告¹⁾がなされている。また、エンジンからの振動、路面からの振動などによって、排ガス部品は、高温に加熱された状態で応力が付加されるため、高温疲労特性も重要な耐熱特性のひとつである。また、空間が制約されているエンジンスペースに設置されるエキゾーストマニフォールドは周囲の部品から拘束されており、エンジンの始動停止による加

熱冷却時に自由な熱膨張収縮が制限される場合があり、熱疲労破損も懸念されている。しかしながら、フェライト系ステンレス鋼の高温疲労特性、熱疲労特性を検討した報告^{2,3)}は少ないのが現状である。そこで本報告は、代表的なフェライト系ステンレス鋼 ($R409L$ 、 $R429EX$ 、 $R430LNM$ および $R434LN2$) について、その 600°C 以上での高温疲労特性、熱疲労特性を比較しその強化機構について検討した。

2 供試鋼および評価方法

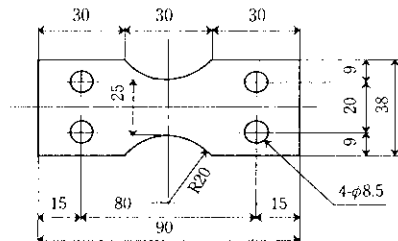
2.1 供試鋼

供試鋼の化学組成を **Table 1** に示す。高温疲労および高温強度試験片は、商用工程で作成した 1.5 mm 厚の冷延焼鈍板から採取した。また、熱疲労試験片は、50 kg 小型鋼塊を鍛造して 30 mm 厚にした後、 $R409L$ は 880°C で 5 min、 $R429EX$ および $R430LNM$ は 950°C で 5 min、 $R434LN2$ は 980°C で 5 min の焼鈍を行ない結晶粒を粒度 No. 7 (JIS G 0552 に準拠) 程度に調整したものから採取した。

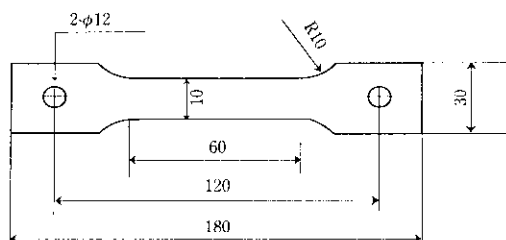
* 平成10年4月9日原稿受付

Table 1 Chemical compositions of specimens

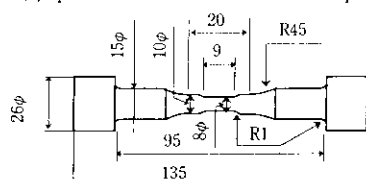
	(mass%)					
	C	Si	Cr	Nb	Ti	Mo
R409L	0.010	0.31	11.0	—	0.25	—
R429EX	0.009	0.85	14.8	0.48	—	—
R430LNM	0.011	0.27	17.5	0.37	—	0.55
R434LN2	0.006	0.25	19.0	0.35	—	1.93



(a) Specimen for fatigue test at elevated temperatures



(b) Specimen for tensile test at elevated temperatures



(c) Specimen for thermal fatigue test

Fig. 1 Dimensions of specimens

2.2 評価方法

2.2.1 高温疲労試験

試験片形状を Fig. 1 (a) に示す。シェンク式高温平面曲げ疲労試験機を用い、回転数を 600°C では 1600 rpm に、800°C では 1300 rpm として、S-N 曲線を作成した。曲げ応力は、破損寿命の 1/2 サイクル時に測定された曲げモーメントを試験片の断面係数で除した値を用いた。

2.2.2 高温引張試験

試験片形状を Fig. 1 (b) に示す。JIS G 0567 に準拠し、設定温度で 15 min 保持し、0.2% 耐力 (PS) までは 0.33%/min、その後破断まで 8.3%/min の引張速度で試験した。この値を後述する高歪み速度の強度 (動的強度) と区別するため、静的強度と記述する。

2.2.3 動的応力-ひずみ曲線測定

高温疲労特性と素材の高温強度の関係を検討するには、高温強度のひずみ速度依存性を考慮し、高温疲労試験と同じひずみ速度での応力、すなわち動的応力-ひずみ曲線を測定することが重要であると考えられる。しかしながら、シェンク式高温平面曲げ疲労試験では、付加ひずみ量、付加応力は板厚方向によって異なるため、単純な応力-ひずみ曲線では、本疲労試験結果との対応はとれない。そ

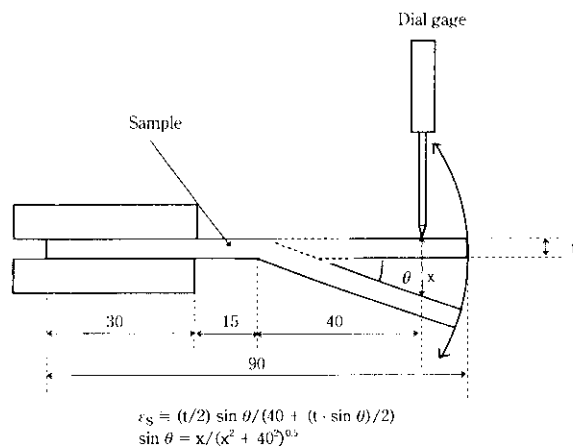
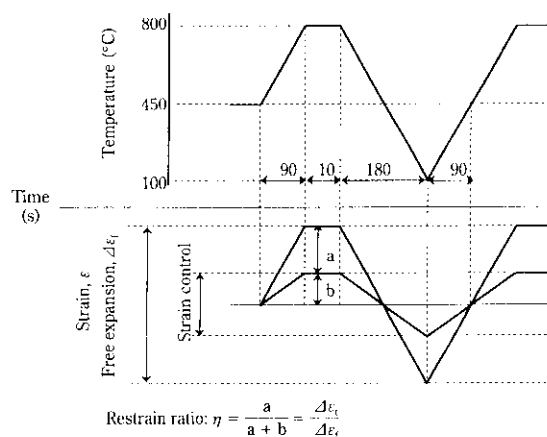
Fig. 2 Method of estimating surface strain (ϵ_s) in Schenck type fatigue test

Fig. 3 Condition of thermal fatigue test (1 cycle = 370 s)

こで、シェンク式高温平面曲げ疲労試験機を用いて、その疲労試験下での動的曲げ応力-表面ひずみ曲線を求めた。本疲労試験機は機械的に変位が一定になるため、室温と高温で変位が変わらないことを利用し、室温で試験片の曲げ変位を Fig. 2 に示したようにダイヤルゲージを用いて測定した。その値を以下の式によって、表面ひずみに換算し、シェンク式高温平面曲げ条件 (100~1600 rpm) での高温の動的曲げ応力-表面ひずみ曲線を近似した。

$$\epsilon_s = (t/2) \sin \theta / (40 + t \cdot \sin \theta / 2), \quad \sin \theta = x / (x^2 + 40^2)^{0.5}$$

ϵ_s : Surface strain

θ : 曲げ角度

t : 板厚 (mm)

x : ダイヤルゲージでの測定変位 (mm)

2.2.4 熱疲労試験

試験片形状を Fig. 1 (c) に、また試験条件を Fig. 3 に示す。フェライト系ステンレス鋼は比較的軟質であるため、本試験条件のような高温では、ひずみ検出用の石英棒の圧力により、熱疲労試験途中で試験片が変形・破損しやすい。そこで、ひずみ計が接触する部分の断面積を増し、その部分からの変形・破損を防いだ。そのため、ひずみ検出範囲内において一定の断面積ではなく、ひずみゲージ間で測定されたひずみより、大きなひずみが試験片中央部に集中している可能性があり、より厳しい条件での評価となっている。熱疲労試験条件は、Fig. 3 に示したように初サイクルの昇温で、上下限温度の中間温度まで荷重制御によって荷重が付加されない自由熱膨張させ、その時点を目安とし、ひずみ制御に移行する。その時の

制御は、上設定温度で圧縮が、下設定温度で引張荷重が付加されるよう油圧サーボシステムによって、見かけのひずみ ($\Delta\epsilon_c$) を制御した。すなわち、ひずみ制御に移行してからは、Fig. 3 に示したように自由熱膨張収縮の一定割合 (拘束率: η) 分だけ、熱膨張、収縮が抑制されている。

$$\text{拘束率: } \eta = \Delta\epsilon_i / \Delta\epsilon_f, \quad \Delta\epsilon_i = \Delta\epsilon_f - \Delta\epsilon_c$$

$\Delta\epsilon_i$: 試験に先だって同じ試験機で測定した自由熱膨張収縮によるひずみ量

$\Delta\epsilon_c$: 石英棒間で制御している見かけのひずみ量

昇温速度は約 4°C/s とし、上設定温度での保持時間は 10 s とした。また破損までの繰り返し数として、荷重-歪みヒステリシスループが安定する 5 サイクル目で発生する最大引張荷重の 70% まで最大引張荷重が低下した時点でのサイクル数を採用した。また 5 サイクル時のヒステリシス曲線から塑性ひずみ量を求めた。ひずみ検出のための標点間距離は 15 mm とした。

3 高温疲労特性

3.1 シェンク式高温疲労試験

Fig. 4 に 600°C および 800°C で的高温疲労試験結果を示す。10⁶ 疲労強度を比較すると、いずれの温度でも R409L < R429EX ≒ R430LNM < R434LN2 の順に後者ほど優れた疲労特性を示した。

一般に疲労特性は強度と相関があるとされているため、Fig. 5 に高温引張試験により測定した 600°C から 900°C の高温耐力と引張強度 (静的引張強度) を示す。600°C では、R409L < R429EX ≒ R434LN2 ≒ R430LNM の順に後者ほど高強度となっている。また、800°C では、R409L < R429EX ≒ R430LNM < R434LN2 の順に後者ほど高強度となっている。Fig. 6 に、静的引張試験の引張強度とシェンク式高温疲労試験による 10⁶ 疲労強度の値を比較して示した。

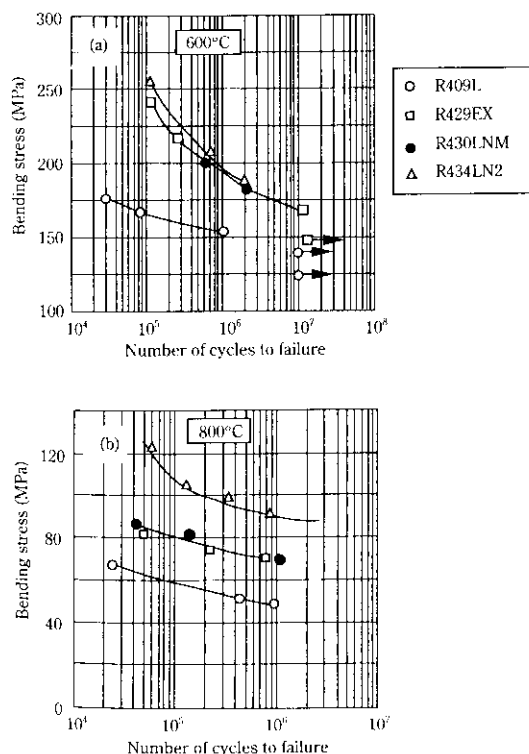


Fig. 4 S-N curves of various stainless steels (1.5 mm) at 600°C and 800°C; (a) 600°C-1600 rpm (b) 800°C-1300 rpm

600°Cにおける10⁶疲労強度は、その温度の静的引張強度より低く、静的引張強度が高い材料ほど疲労寿命も優れている。一方、800°Cでは、10⁶疲労強度は、その温度の静的引張強度より高い値を示している。これは、シェンク式高温平面曲げ疲労試験の曲げ応力は表面に付加される応力であること、および高温強度を測定する際のひずみ速度と高温疲労試験時のそれが違うことに起因すると考えられる。そこで、シェンク式高温平面曲げ疲労試験下での曲げ応力 (動的曲げ応力)-ひずみ曲線のひずみ速度依存性の評価を検討した。ここのひずみは、2.2.3項の方法により、表面ひずみで評価した。

3.2 動的曲げ応力-表面ひずみ曲線

Fig. 7 に 800°C における R429EX の 100 rpm, 300 rpm および 1300 rpm の動的応力-表面ひずみ曲線を示す。回転数が増えるにつれて、すなわちひずみ速度が増えるにつれて、強度が著しく上昇する。高温強度は、ひずみ速度に大きく影響することがわかる。Fig. 8 に、600°C、1600 rpm の条件で行なった R409L, R429EX および R434LN2 の動的応力-表面ひずみ曲線を示す。なお、R430LNM は

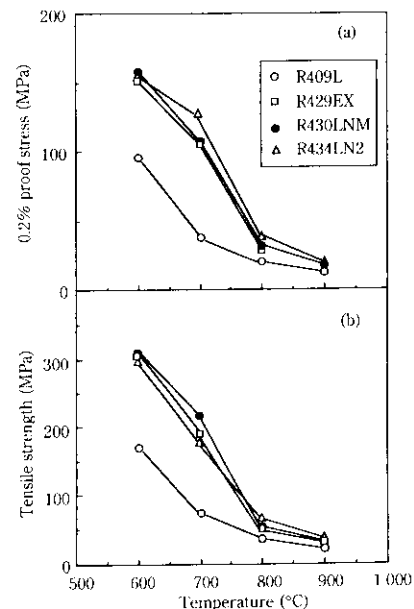


Fig. 5 Strength at elevated temperatures; (a) 0.2% proof stress (b) Tensile strength

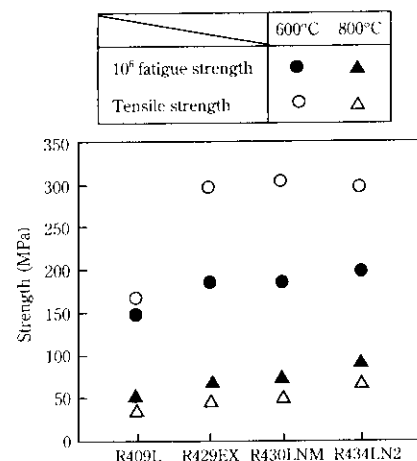


Fig. 6 Comparison between 10⁶ fatigue strength and tensile strength (1.5 mm)

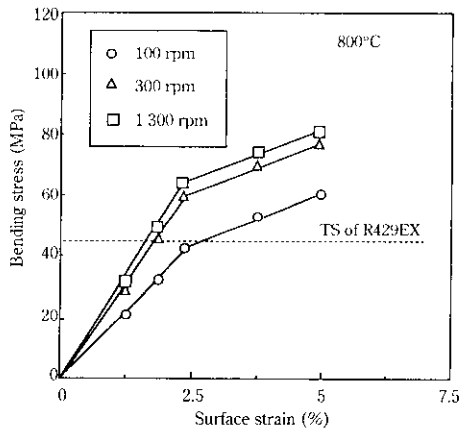


Fig. 7 Influence of rotation speed of Schenck type fatigue test on bending stress of R429EX at 800°C

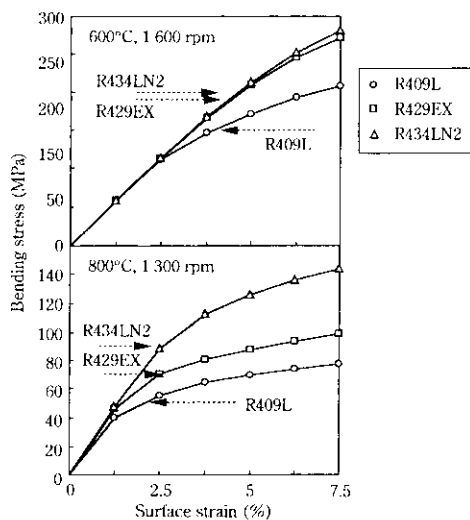


Fig. 8 Stress-surface strain curves of ferritic stainless steels in Schenck type fatigue test at 600°C and 800°C
 ←-----: 10^6 fatigue strength

R429EX と同様な動的応力-表面ひずみ曲線を示したため省略している。R429EX と R434LN2 での差は小さく、R409L はこれらの強度より低い値を示した。一方、800°C における動的応力-表面ひずみ曲線は、R409L < R429EX < R434LN2 の順に後者ほど高強度化し、特に 600°C の挙動と比較し、R434LN2 が他鋼より高強度化している。また、Fig. 8 中に 10^6 曲げ疲労強度を矢印で示している。600°C および 800°C の各鋼の 10^6 疲労強度と動的応力-表面ひずみ曲線の強度序列がよく対応していることがわかる。以上から試験温度が 800°C のシェンク式高温平面曲げ疲労試験による 10^6 疲労強度が高温引張試験の静的引張強度より高かった理由は、付加応力形態の違い以外に高温疲労試験時のひずみ速度が高温引張試験のそれよりも大きく、素材が高強度化したことも一因と考えられる。

4 熱疲労特性

4.1 熱疲労寿命と拘束率の関係

Fig. 9 に 100–800°C の熱疲労寿命と拘束率の関係を示す⁴⁾。拘束率が 0.8 のように高い場合、R430LNM < R434LN2 < R429EX < R409L の順に後者ほど優れた寿命を示した。一方、拘束率が 0.3 程

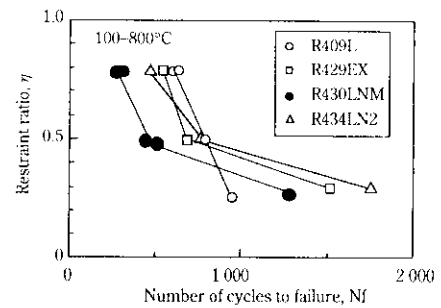


Fig. 9 Relation between restraint ratio and number of cycles to failure in thermal fatigue test

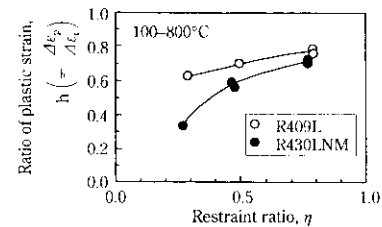


Fig. 10 Relation between ratio of plastic strain and restraint ratio in thermal fatigue test

度まで低下すると、R429EX、R430LNM および R434LN2 は、寿命が著しく向上しているが、R409L の場合、寿命の向上はわずかであり、R409L < R430LNM < R429EX < R434LN2 の順で、後者ほど優れた寿命を示した。このように拘束率により、各鋼種での優劣が異なるので、寿命評価には注意を要すると考えられる。

4.2 熱疲労寿命律速因子について

熱疲労寿命に大きく影響する因子は、強度および延性と言われている⁵⁻⁷⁾。また、Forrest ら⁸⁾は、塑性ひずみ比 ($h = \Delta\epsilon_p / \Delta\epsilon_t$) の概念を提案し、この値が 0.5 を超えた場合、寿命は延性律速であり 0.5 以下の場合強度律速になるとしている。今回測定した熱疲労試験に関して、Fig. 9 に示したように、熱疲労寿命の優劣は拘束率によって変化しているため、拘束率によって寿命を決定する主因子が変化している可能性が考えられる。そこで、特に、寿命の逆転が明確であった R409L と R430LNM について、塑性ひずみ比を比較した。Fig. 10 に拘束率と塑性ひずみ比 (h) の関係を示す。拘束率が 0.5 以上では、両鋼ともに、塑性ひずみ比は 0.5 以上であり、寿命は延性律速と考えられる。一方、拘束率が 0.3 にまで低下すると、R409L の塑性ひずみ比は、0.6 程度まで低下し、R430LNM のそれは、0.3 程度まで低下している。このように、いずれの鋼も拘束率が低下するにつれ、塑性ひずみ比が低下している。これは、拘束率の低下につれ、寿命は、延性律速から強度律速に変化していくことを意味しているものと考えられる。そこで、熱疲労寿命におよぼす延性と強度の影響について検討した。

4.3 熱疲労寿命と延性の関係

一般に、熱疲労特性は、塑性ひずみ量と寿命の両対数で整理される。これは、Manson⁹⁾ と Coffin⁶⁾ によって、提案された (1) 式が成立する場合が多いからである。

$$N = (C / \Delta\epsilon_p)^{1/a} \dots \dots \dots (1)$$

$$C = (1/2) \ln \{1 / (1 - \phi)\}, \phi: \text{絞り}$$

材料の寿命は、塑性ひずみ量 ($\Delta\epsilon_p$)、延性の項 (C)、 a によって

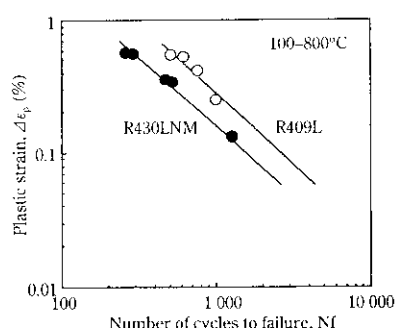


Fig. 11 Relation between plastic strain and number of cycles to failure in thermal fatigue test

Table 2 Comparison between parameters of Manson-Coffin relation and results of tensile test

	Results of thermal fatigue test $\Delta\epsilon_p N^{\alpha} = C$		Results of tensile test at 100°C	
	α	C	ϕ	$C = 1/2 \times \{\ln(1/(1-\phi))\}$
R409L	1.0	1.6	0.9	1.2
R430LNM	0.9	0.9	0.8	0.8

決定される。

Fig. 11 に今回測定した R409L と R430LNM の $\Delta\epsilon_p$ と寿命の関係を両対数軸上に示す。ほぼ平行な直線関係が得られ (1) 式が成立していることがわかる。そこで、両鋼の α , C を直線から求めた。結果を Table 2 に示す。また、(1) 式の延性の項 C は、素材の絞り量に依存することも知られている^{5,6)}。絞り量は温度によって大きく変化するが、熱サイクル中の下限温度が最も大きな引張歪みを受けるため、その時の絞り特性が寿命に大きく影響すると考えられる。そこで下限温度 (100°C) での絞り量を熱疲労試験片を用いて高温引張試験により測定した。Table 2 にその絞り量とその値から見積もられた延性の項 C を熱疲労試験から得られた延性項 C と比較して示してある。100°C の絞り値から得られた R409L の延性項 C は、R430LNM のそれより 1.5 倍程度大きい。R409L および R430LNM の高温引張試験から得られた延性項 C は、熱疲労試験から得た延性項 C の値にほぼ一致し、以上の議論の妥当性を示している。一方、 α は両鋼とも同程度の値であり、R409L の延性項 C が R430LNM のそれより 1.8 倍程度大きいこと、延性律速の条件、すなわち高拘束率条件では、R409L の方が熱疲労特性に有利であると考えられる。

4.4 熱疲労寿命と強度の関係

Fig. 10 に示したように、低拘束率になるにつれて塑性ひずみ比

が 0.5 以下となり、寿命律速因子は主として強度に移行すると考えられる。特に、塑性ひずみ比が 0 に、すなわち塑性ひずみ量 ($\Delta\epsilon_p$) が 0 に近づくにつれ、(1) 式から寿命が $(1/\Delta\epsilon_p)^{1/\alpha}$ にしたがって著しく向上することが期待される。また、(1) 式中パラメーター $\Delta\epsilon_p$ は、強度に影響される^{9,10)}。R409L と R430LNM のいずれの鋼も、拘束率の低下によって、塑性ひずみ比 (塑性ひずみ量) は低下する。その際、両鋼の強度の違いによって、その低下挙動が異なるものと考えられる。すなわち、塑性ひずみ比の低下挙動は、R409L に比較して強度の高い R430LNM は Fig. 10 に示したようにより高い拘束率から低下していくため、拘束率が 0.5 以下になると R430LNM の寿命は (1) 式にしたがって著しく向上し、Fig. 9 に示したように熱疲労寿命の優劣の逆転が生じたものと考えられる。

5 自動車排気系部材への適用

自動車排気系部材は、熱サイクルに対し低拘束率を前提に設計されていると考えられているため、4 章の結果から、R429EX、R430LNM および R434LN2 は R409L よりも優れた熱疲労特性を示すことが期待できる。熱疲労特性および高温疲労特性に着目すると、R409L では特性不足の場合、Nb あるいは Mo 添加によって高強度化した R429EX、R430LNM がより優れた寿命を示すものと考えられ、採用が拡大されつつある。R429EX、R430LNM は、加工性と耐酸化性の観点から選定される。比較的低 Cr であることを特徴とする R429EX は、加工性重視の場合に適当であり¹¹⁾、一方 R430LNM は、耐酸化性重視の場合に適当である。さらに優れた熱疲労特性、高温疲労特性が要求される場合、2%Mo 添加によって、高強度化した R434LN2 が推奨される。

6 結 言

フェライト系ステンレス鋼の 600°C および 800°C でのシェンク式高温平面曲げ疲労特性、100-800°C の熱疲労特性を調査検討し、以下の結果を得た。

- (1) 高温疲労特性は、R409L < R429EX $\approx$ R430LNM < R434LNM2 の順に、後者ほど優れた。
- (2) 800°C の 10^6 曲げ疲労強度は、その温度での引張強度 (TS) よりも高かった。この理由の一つとして、応力形態の違い以外に高温疲労試験時の歪み速度が高温引張試験時のそれよりも大きく、それによって高温強度が高まったことも考えられる。
- (3) 低拘束率条件では、R429EX、R430LNM および R434LN2 は R409L よりも優れた熱疲労特性を示した。これは、これらの鋼の強度が室温から高温までの全温度範囲で R409L のそれよりも高いためと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 例えば、小野 寛、佐藤信二、川崎能夫、岡 裕、大橋延夫：川崎製鉄技報、7(1975)2, 21
- 2) 門 智、山崎恒友、坂本 徹、半沢 賢、山中幹雄、小川忠雄、吉田耕太郎：製鉄研究、292(1977), 63
- 3) 中村定幸、宮崎克久、植松美博：材料とプロセス、4(1991)6, 1788
- 4) 宮崎 淳、多田昌哉、佐藤 進：材料とプロセス、7(1994)6, 1683
- 5) S. S. Manson: NACE Technical Note 2933, (1953)
- 6) L. F. Coffin: Proc. 4th Sagamore Conf., (1957), 219
- 7) 平 修二編：「熱応力と熱疲労」、(1974), 103, [日刊工業新聞社]
- 8) P. G. Forrest and K. B. Armstrong: Joint Int. Conf. on Creep, London, (1963)
- 9) 平川賢爾、時政勝行：鉄と鋼、4(1977), S255
- 10) 奥 学、中村定幸、平松直人、植松美博：日新製鋼技報、66(1992), 37
- 11) 宮崎 淳、郡司牧男、吉岡啓一：川崎製鉄技報、25(1993)2, 34