論文

鉄と鋼 Vol. 79 (1993) No.11

パラメータ解析法による 各種高温材料の低サイクル疲労寿命評価

小林 一夫*・井島 清*・山口 弘二*・西島 敏*

Low-Cycle Fatigue Life Analyzed by Parameter Method for Various High Temperature Materials

Kazuo Kobayashi, *Kiyoshi* Ijima, *Koji* Yamaguchi and *Satoshi* Nishijima

Synopsis : Low-cycle fatigue life for various kinds of high temperature materials has been analyzed by a modified Larson-Miller parameter, written by $P=T(\log N_{25}-A\log\dot{\varepsilon}+B)$, where T is temperature, N_{25} is fatigue life under symmetrical strain wave shapes, $\dot{\varepsilon}$ is strain rate, and A and B are constants. Test data used in the analysis are from NRIM Fatigue Data Sheets of popular engineering materials of nine kinds, ten heats including carbonsteel to Fe-base super alloy. The results have been compared between the materials and compared with statistical analysis results adopted in a design code.

Key words : low-cycle fatigue life ; high temperature materials ; modified Larson-Miller parameter ; NRIM Fatigue Data Sheets.

1. 緒言

前報[1)]において，クリープ破断強度に対するLarson-Millerパラメータを改良し，高温低サイクル疲労寿命の温度，ひずみ速度依存性を系統的に評価する新しいパラメータ解析法を提案した。本報告では，このパラメータ解析法を用いて各種高温材料について解析した結果を述べるとともに，材種間の比較，及び高温機器に対する疲労設計基準[2)]に採用されているDiercks[3)]や和田[4)]らの統計的解析法との比較などを行った。

解析には，各種高温材料についてこれまで系統的に試験が遂行され，出版された金材技研疲労データシートのデータ[5)]を用いたが，一部文献のデータ[6)7)]も用いた。そこで，最初に金材技研高温疲労データシートの内容について簡単に紹介し，以下パラメータ解析の結果等について述べる。

2. 金材技研高温疲労データシート[5)]について

著者らは，これまで産学各界の協力を得て，金材技研高温疲労データシートの作成に携わってきた。その中で高温低サイクル疲労の試験計画に関しては，温度，ひずみ速度，ひずみ波形依存性など系統的な低サイクル疲労特性データの整備に主眼をおいている。その結果，Table 1のような低合金から超合金までの代表的高温材料9材種を選定した。これらの供試材は，Cr含有量が約0, 1, 1.25, 2.25(2 heats), 9, 12, 18(SUS304 and SUS316), 20%のものである。表には，各材料の主な用途も示した。

Table 1. Materials for NRIM Low-cycle Fatigue Data Sheets.

Materials	Chemical composition	Application
SB 49	0.3C	Boiler
ASTM A470-8	1Cr-1Mo-0.25V	Steam turbine rotor
SCMV 3	1.25Cr-0.5Mo	Pressure vessel
SCMV 4(I, II)	2.25Cr-1Mo	Pressure vessel
ASTM A387 Gr.91	9Cr-1Mo-0.2V	Steam generator
SUH 616	12Cr-1Mo-1W-0.3V	Steam turbine blade
SUS 304	18Cr-8Ni	Pressure vessel
SUS 316	18Cr-8Ni-2Mo	Pressure vessel
NCF 800	20Cr-33Ni-0.4Ti-0.5Al	Chemical plant

Table 2. Test conditions for NRIM Low-cycle Fatigue Data Sheets.

Strain wave shape	Number of testing temperature	Strain rate
Symmetrical triangular	5	$\dot{\varepsilon}=10^{-3}s^{-1}$
	2	$\dot{\varepsilon}=5\times10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}s^{-1}$
Slow-fast		$\dot{\varepsilon}=10^{-4}, 10^{-5}s^{-1}$ in tension side $\dot{\varepsilon}=5\times10^{-3}s^{-1}$ in compression side
Strain holding in tension side	2	$\dot{\varepsilon}=5\times10^{-3}s^{-1}$ Hold time=0.1 and 1 h

低サイクル疲労試験の条件は，Table 2に示す。試験はすべて軸ひずみ制御である。対称三角波試験はすべての材料について，温度とひずみ速度を系統的に変えて行っている。全ひずみ範囲は，0.02～0.004程度である。鋸歯状波，引張保持台形波試験はCr含有量が1, 2.25(1heat), 9, 12, 18(SUS304), 20%のものについて行っているが，現在なお

平成5年1月11日受付 平成5年7月2日受理 (Received on Jan. 11, 1993 ; Accepted on July 2, 1993)
* 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku Tokyo 153)

試験遂行中のものもある。

また，併行して回転曲げによる10^8サイクルまでの高温高サイクル疲労特性も求め，データシートを作成してきた[8]。回転速度は125Hzで，供試材の一部は低サイクル疲労のものと同一である。

3. パラメータ解析法とその解析結果

3・1　パラメータ解析法について

前報[1]で提案したパラメータ解析法を概説する。疲労寿命に対する温度，ひずみ速度を同時に評価するパラメータPは，

$$P=T(\log N_{25}-A\log\dot{\varepsilon}+B) \quad \cdots\cdots(1)$$

と表した。ここで，Tは絶対温度，N_{25}は疲労寿命，$\dot{\varepsilon}$は対称三角波のひずみ速度及びA，Bは定数である。

さらに，このパラメータPを全ひずみ範囲$\Delta\varepsilon_t$の関数として，

$$P=A_0+A_1\log(\Delta\varepsilon_t-\Delta\varepsilon_0) \quad \cdots\cdots(2)$$

で表示すると，疲労寿命N_{25}は，

$$\log N_{25}=(A_1/T)\log(\Delta\varepsilon_t-\Delta\varepsilon_0)+A\log\dot{\varepsilon}+(A_0/T)-B \quad \cdots\cdots(3)$$

のように書くことができた。ここで，A_0，A_1及び$\Delta\varepsilon_0$は定数であるが，$\Delta\varepsilon_0$は耐久限度のひずみ範囲に相当する。

これらの未知定数は，式(3)にデータをあてはめ，最小2乗法により決定することができる。具体的には，最初に$\Delta\varepsilon_0$として適当な値を仮定し，試験結果のN_{25}データに対し，残差平方和が最小となるように定数A，B，A_0，A_1を決定する。そして逐次$\Delta\varepsilon_0$の値を変化させつつ，残差平方和が最小となる最適値を探せばよい。

3・2　解析結果

各種材料に対して求めたパラメータ定数を，Table 3に示す。単位は，$\Delta\varepsilon_t$：mm/mm，T：K，$\dot{\varepsilon}$：s^{-1}，N_{25}：サイクル数，である。疲労データシートと文献[6)7)]のデータは，低サイクル域ではほとんど同じであったが，長寿命側で若干の相違があった。そのため，Table 3の$\Delta\varepsilon_0$の値にヒート間の相違があることがわかる。

Table 3. Constants in equations (2) and (3).

Materials	Range of temp.(℃)	A	B	A_0	A_1	$\Delta\varepsilon_0$ ($\times10^{-2}$)
SB 49	200～400	0.066	−2.25	−1630	−1130	0.24
A470-8	400～550	0.222	−1.49	−553	−1070	0.34
SCMV 3	300～500	0.103	−2.20	−1250	−992	0.32
SCMV 4(I)	300～500	0.075	−1.60	−1080	−1090	0.29
SCMV 4(II)	300～500	0.175	−2.37	−1240	−975	0.39
SUH 616	300～600	0.095	−3.02	−2464	−1299	0.43
SUS 304	400～600	0.162	−2.50	−1990	−1400	0.33
SUS 316	400～600	0.163	−1.75	−1400	−1300	0.48
NCF 800	500～600	0.257	−1.13	−453	−1270	0.35
SCMV 4[7)]	450～600	0.013	−1.13	499	−424	0.46
AISI 304[6)]	430～650	0.202	−1.72	−859	−1259	0.29
AISI 316[6)]	430～650	0.196	−1.74	−1382	−1512	0.26
Incoloy 800[6)]	538～649	0.241	−1.72	−1266	−1552	0.22

一例として，Fig. 1にSUS 316鋼における定数決定の際のパラメータPと$\Delta\varepsilon_t$についてのマスター曲線を示す。

Fig. 2は，SCMV 4(I)鋼のひずみ速度$10^{-3}s^{-1}$における低サイクル疲労寿命曲線の温度依存性を示している。Fig. 3

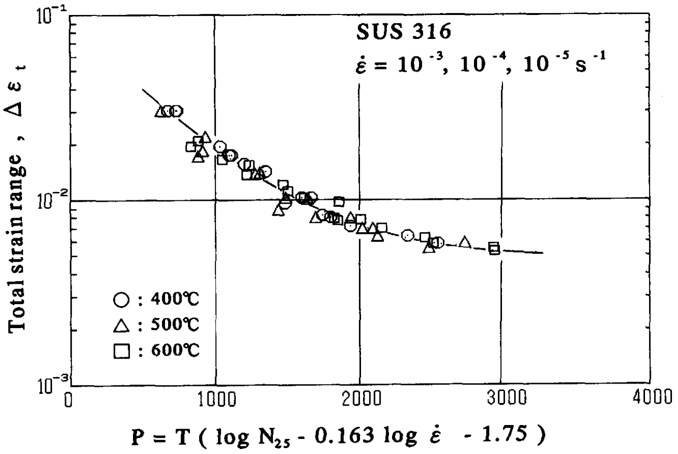

Fig. 1. Master curve for SUS 316 steel by parameter analysis.

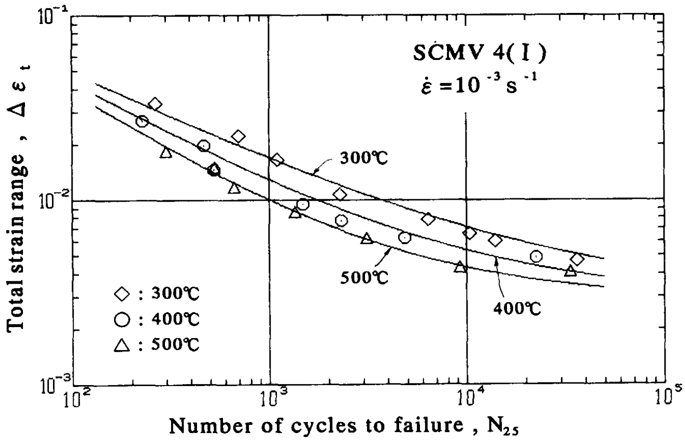

Fig. 2. Temperature dependence of fatigue life for SCMV 4 (I) steel at $10^{-3}s^{-1}$.

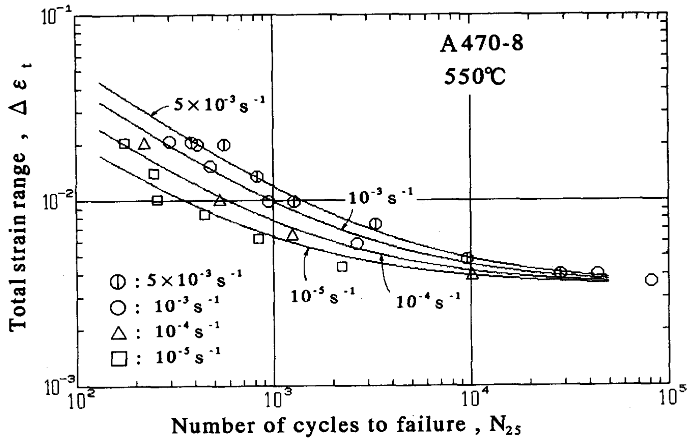

Fig. 3. Strain rate dependence of fatigue life for A470-8 steel at 550°C.

は，A470-8鋼の550°Cにおける低サイクル疲労寿命曲線のひずみ速度依存性を示したものである。両図中のプロットは試験データを表しており，本提案の解析曲線と良く一致していると考えられる。

4. 考察

4・1 材種間の比較

疲労寿命の材種間の比較を，式(3)とTable 3の定数を用いて検討してみる。Fig. 4は，各材料のひずみ速度$10^{-3}s^{-1}$，全ひずみ範囲0.01における$\log N_{25}$対1/Tの関係を式(3)で表したものである。この図には，文献データの解析結果として，Conwayら[6]の304，316，Incoloy800，及び日本鉄鋼協会の共同研究[7]におけるSCMV 4鋼のデータも加えている。図から，疲労寿命は低合金鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の二つのグループに大きく分れ，かつ12Crマルテンサイト系ステンレス鋼のSUH616鋼はそれらの中間に位置していることがわかる。この様な傾向は，各種高温材料の系統的な疲労データとパラメータ解析で，明確になったことと思われる。

式(3)から，図の直線の傾きは$A_0+A_1\log(\Delta\varepsilon_t-\Delta\varepsilon_0)$で，

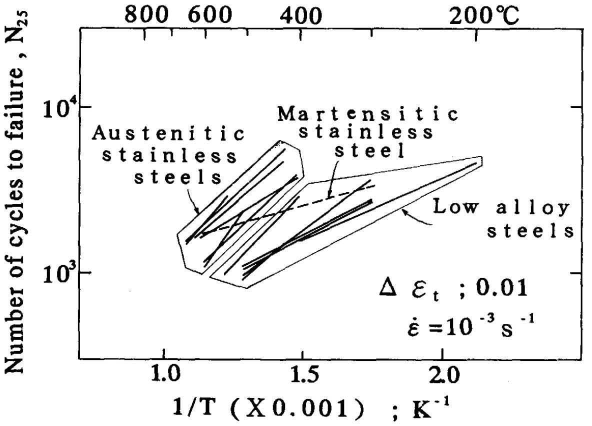

Fig. 4. Arrhenius plots of fatigue life for various kinds of materials.

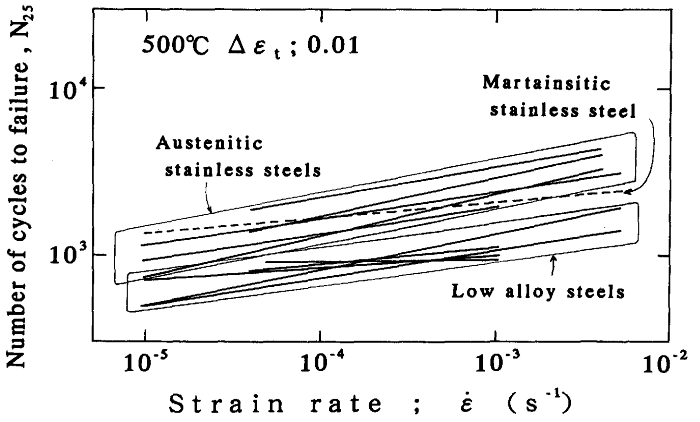

Fig. 5. Strain rate dependence of fatigue life for various kinds of materials.

切片は$A\log\dot{\varepsilon}-B$でそれぞれ与えられるので，直線の傾き，位置は$\Delta\varepsilon_t$及び$\dot{\varepsilon}$の大きさに依存する。そのため，疲労寿命が低合金鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の二つのグループに分れる傾向も，また$\Delta\varepsilon_t$等に依存する。例えば，$\Delta\varepsilon_t$が0.006の場合，二つに分れる傾向はより顕著になるが，$\Delta\varepsilon_t$が0.02の場合，二つのグループは一部が重なってくる。

また，$\log N_{25}$対$\log\dot{\varepsilon}$の関係に式(3)とTable 3の定数を用いて検討した結果がFig. 5である。この図からも，疲労寿命は低合金鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の二つのグループに大きく分れる傾向が明らかである。

Fig. 4，Fig. 5で二つのグループに分れた理由は，結晶構造の違いによる空孔の拡散速度の違い，Cr含有量の違いによる耐酸化性の違いなどが複雑に絡み合った結果と想像される。

4・2 統計的解析法との比較

Diercks[3]は，アメリカ国内のデータを集め304鋼の対称三角波の低サイクル疲労寿命の温度，ひずみ速度依存性を

$$(\log N_{25})^{-1/2}=1.20551064+0.66002143\cdot S+0.18040042\cdot S^2-0.00814329\cdot S^4+0.00025308\cdot R\cdot S^4+0.00021832\cdot T\cdot S^4-0.00054660\cdot R\cdot T^2 \quad\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

で表した。ここで$S=\log(\Delta\varepsilon_t/100)$，$R=\log\dot{\varepsilon}$，$T=T_c/100$である。単位は，$\Delta\varepsilon_t$：%，$T_c$：°C，$\dot{\varepsilon}$：$s^{-1}$，$N_{25}$：サイクル数，である。

Diercksの方法は，純粋な統計計算による手法で，この回帰曲線から寿命で1/20，ひずみ範囲で1/2の安全係数を掛けた下限線が，アメリカ機械学会ASMEのボイラー及び圧力容器の疲労設計曲線[2]になっている。

和田[4]は，304，316，321ステンレス鋼の日本のデータをDiercksと同様な統計的解析することによって，3鋼種まとめた一つの評価式を得ている。

今回のパラメータ法と上記の統計的解析法の結果の比較を行ってみよう。これらの解析には，疲労寿命が10^5オーダ以下の，それぞれ別のデータを用いている。そのため，参照するデータとしては，それぞれの解析に用いられておらず，かつ低サイクルから高サイクル域までの試験が実施された304鋼の小川[9]やSoo[10]のデータと，Jaskeの316鋼[11]のデータを用いて，高サイクル域への外挿性まで検討してみる。彼等は，10^6サイクル以上のデータを得るため，軸ひずみ制御疲労試験を周波数1Hz[9]，あるいは40Hzの軸荷重制御疲労試験[10]，またはひずみ速度$4\times10^{-3}s^{-1}$で安定サイクルまで行い以後荷重制御に切り換える試験[11]を実施し，低サイクルデータと結びつけている。

Fig. 6は，それぞれ538，600°Cの試験データと三つの解析曲線の比較を示している。低サイクル域では，三つの解析結果は，ほぼ同じで，試験データともほぼ一致している。しかし，高サイクル域では，パラメータ法と統計的解析法

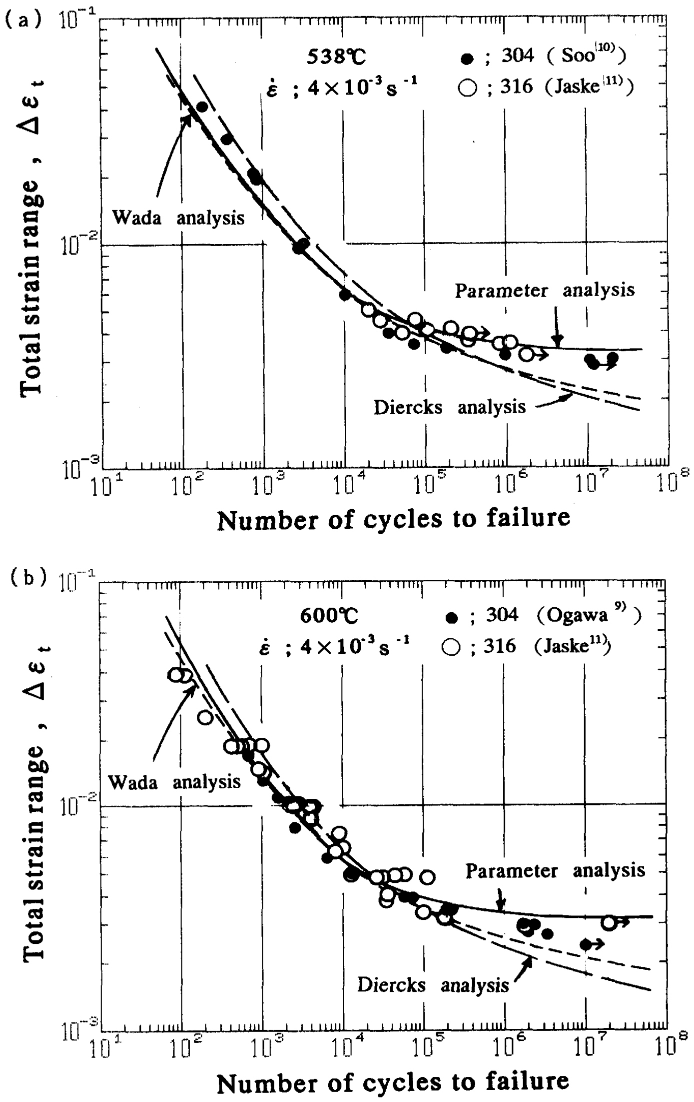

Fig. 6. Comparision of three analysis results by using raw testing data of Ogawa, Soo and Jaske.
(a) 538°C (b) 600°C

の結果に差が現れるが，試験データは耐久限ひずみの存在を示唆している。耐久限ひずみの絶対値の比較は，同一ヒートの結果を用いるべきものであろう。同一ヒートの回転曲げ高サイクル疲労データとの比較は次節で行う。

Diercksや和田らの方法は，高温機器の疲労設計曲線を作成する目的のため，なるべく多数ヒートの材料データを集めて解析し，実験的検証が困難な高サイクル域までの外挿は，保守的（安全側）になるように配慮しているものと考えられる。

4・3　同一ヒートの耐久限ひずみの比較

今回のパラメータ解析の特徴は，低サイクル疲労寿命の温度，ひずみ速度依存性の評価が熱活性化過程に立脚していることばかりでなく，同時に耐久限のひずみも得られることである。ただし，この耐久限ひずみは推定値であり，またその温度依存性等が無視されている。

そこで，耐久限度のひずみについて，同一素材で求めた高温高サイクル疲労データシートにおける10^8サイクル回転曲げ疲労強度[8]とともに，小川[9]，Jaske[11]，Soo[10),12]らの別ヒートの軸制御高サイクル疲労試験データなどとも比較してみる。この際，回転曲げ疲労では，耐久限近傍でも塑性ひずみが生じていると考えられるため，低サイクル疲労試験で得られている繰返し応力-ひずみ曲線を使った弾塑性計算により，応力からひずみへの換算を行った。各材料についての結果がTable 4である。

パラメータ法から求まった耐久限ひずみ$\Delta\varepsilon_0$と弾塑性計算から求まる10^8回耐久限ひずみは，一部の材料，温度で合わないところもある。これは，周波数の違いが要因の一つと考えられるが，全体的には一致しているといえるだろう。

また，Table 4において耐久限ひずみの温度依存性も，回転曲げ耐久限からの換算ひずみやJaske, Sooらのデータから考えて，それほど大きくないといえるだろう。

一般に，高サイクル疲労における耐久限は，微小き裂の停留限界と考えられている[13]。高温大気中ではき裂閉口現象を介して酸化が影響を及ぼすが，酸化の影響は，材質，酸化皮膜特性などに大きく依存する。また，最近著者らのグループで認められているように酸化皮膜によって表面すべりが阻止される表面強化現象[14]も介入する可能性があるなど，高温疲労寿命の耐久限ひずみを支配する要因は，複雑でまだ解明されていない。そのため，今回のパラメータ解析で，耐久限ひずみの推定値$\Delta\varepsilon_0$に温度依存性を無視することは，現時点では止むを得ないと考えた。

本解析法をひずみ保持台形波などに適用する場合，Bui-Quocら[15]のように引張り側の等価ひずみ速度を適切に仮定すれば応用は可能であるとも考えられる。しかし，slow-fast波や片側ひずみ保持台形波のように非対称波形の場合，ク

Table 4. Comparison of strain range at fatigue limit for various kinds of materials.

Materials	Temp. (℃)	Strain range at fatigue limit, $\Delta\varepsilon_0$ Parameter analysis (×10⁻²)	Rotating bending tests (×10⁻²))	Data of references (×10⁻²)
A470-8	500	0.34	0.38	
	550		0.32	
SCMV 4(II)	300	0.39	0.37	
	400		0.35	
	500		0.32	0.25[12)]
SUS 304	400	0.33	0.54	0.35[10)]
	500		0.38	0.3[10)]
	600		0.35	0.35[10)], 0.27[9)]
SUS 316	400	0.48	0.57	0.353[11)]
	500		0.34	0.347[11)]
	600		0.34	0.292[11)]
NCF 800	500	0.35	0.36	0.4[12)]
	600		0.33	0.3[12)]

リープ損傷の累積過程,酸化皮膜の割れ挙動[16]などが対称三角波とは異なり，また対称三角波のように耐久限ひずみが存在するかどうかも不明であるため，本解析法を非対称波形に適用することは今後の課題としたい。

5. まとめ

著者らが前報[1]で提案した,対称三角波の低サイクル疲労寿命の温度，ひずみ速度依存性を評価できる新しいパラメータ解析法を用いて，金材技研疲労データシートの各種高温材料の系統的なデータについて解析した。その結果，本解析法は，各種高温材料について，疲労寿命の温度，ひずみ速度依存性を統一的に評価することができた。さらに,疲労寿命の温度依存性等の挙動において，低合金鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の二つのグループに分れることがわかった。また，本解析法は，従来の統計的解析手法に比べ低サイクル域ばかりでなく，高サイクル域への外挿性にも優れている可能性があるということが，同一ヒートの回転曲げ高サイクル疲労データなどから示唆された。今後は，軸制御下の長時間高サイクル疲労データによる外挿性の検証や非対称波形への適用などが課題と考えられる。

最後に,金材技研高温疲労データシートの作成において,供試材の選定や試験条件の設定等について，産学各界のご協力を頂いたことを記し，関係各位に感謝する。

文　　献

1) 山口弘二,小林一夫,井島　清,西島　敏：鉄と鋼,**79** (1993), p.1284
2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Case N-47-23, ASME, (1986)
3) D. R. Diercks and D. T. Raske : ASME Annual Winter Meeting, (1976), p.1
4) Y. Wada, Y. Kawakami and K. Aoto : Thermal Stress, Material Deformation and Thermo-mechanical Fatigue, PVP Vol. 123, ed. by Sekitoglu and S. Y. Zamrik, Book No. G00369, (1987), p.37 [ASME]
5) NRIM High Temperature Low-cycle Fatigue Data Sheets, Nos. 7, 15, 22, 28, 36, 49, 58, 62, 68, NRIM, (1978～1991)
6) J. B. Conway, R. H. Stentz and J. T. Berling : Fatigue, Tensile and Relaxation Behavior of Stainless Steels, TID-26135, (1975), [U. S. Atomic Energy Commition]
7) 2 1/4Cr-1Mo鋼の高温低サイクル疲労特性に関する共同研究報告（日本鉄鋼協会クリープ委員会熱疲労試験分科会編），(1978)
8) NRIM High Temperature High-cycle Fatigue Data Sheets, Nos.6, 14, 15, 23, 32, 35, 42, 48, 55, NRIM, (1978～1986)
9) K. Ogawa, H. Yoshizawa and S. Oote: 8th Int. Conf. on SMiRT, Bruxell, (1985), p.195
10) P. Soo and J. G. Y. Chow: Trans. ASME, J. Eng. Mater. Tech., **102** (1980), p.141
11) C. E. Jaske and N. D. Frey: Trans. ASME, J. Eng. Mater. Tech., **104** (1982), p.137
12) P. Soo and J. G. Y. Chow: J. Eng. Mater. Tech., Trans. ASME, **103** (1981), p.97
13) たとえば,西谷弘信：疲労強度学(総合材料強度学講座　第6巻)，(1985)，[オーム社]
14) 金澤健二，佐藤守夫，木村　恵：材料，**39** (1990)，p.175
15) A. Zang, T. Bui-Quoc and R. Gomuc: Trans. ASME, J. Eng. Mater. Tech., **112** (1990), p.422
16) 野中　勇，北川正樹，大友　暁，和田雄作：鉄と鋼，**73** (1987)，p.2267