

## クリープ破断強度外挿法の精度と標準化

藤田 利夫\*・門馬 義雄\*<sup>2</sup>

## Accuracy of Extrapolation for Creep-rupture Strength and Standardization of Extrapolation Methods

Toshio FUJITA and Yoshio MONMA

## 1. 緒 言

高温で使用される構造材料の長時間クリープ特性を正確に把握することは、高温機器の設計、製造、運転及び保守における最も基本的な要件の一つである。また、高温用構造材料の研究開発においては、比較的短時間のクリープ破断試験により得られるデータを外挿し、実用上必要な長時間（例えば 10 万 h）強度を推定することが必要である。このような目的のために用いられるクリープ破断データ外挿法としては化学反応速度論に基づいた TTP（時間・温度パラメータ）法が多数提案されており、中でも Larson-Miller (LM) や Orr-Sherby-Dorn (OSD) パラメータ法は広く用いられている<sup>1)2)</sup>。

これらの TTP 法の適用に当たっては、それぞれのパラメータについて固有の材料定数（パラメータ定数）を決定し、温度-応力-クリープ破断時間の関係を統一的に表す主破断曲線を得る必要がある。これまでは材料の種類やクリープ破断データに依存しないパラメータ定数を用いて、グラフ上でマニュアルで主破断曲線を得る目視 TTP 法が主流であった。しかし、目視 TTP 法によるクリープ破断データのあてはめ及び外挿は客観性がなく、解析者による個人差が反映され、精度に対する定量的な検討も不可能である。このため近年、高温強度の解析・評価に計算機が多用されるに伴い、クリープ破断データ解析をより客観的に行うために TTP 法を始めとするさまざまなクリープ破断データ解析・整理のプログラムが開発されている<sup>3)</sup>。特に TTP 法についてはその標準化について、ISO 6303（圧力容器鋼の長時間応力破断特性の推定）の付録に代表されるような国際的な動きがあらわれている。

昭和 55 年 4 月、本委員会は当協会標準化委員会を通じて ISO TC 17（鉄鋼部会）SC 10（鋼の高温特性分科会）より、上記 ISO 6303 の国際規格化に関する検討依頼を受け、直ちに本分科会を組織し、高温材料の長時

間強度の推定法を確立すべく、内外の研究動向の調査及び 2 回にわたる共同研究を実施し、成果の一部を「ISO 6303 に準拠したクリープ破断データ外挿法の手引」として刊行した。本報告はこれらの活動状況を取りまとめたものである。

## 2. 分科会の構成及び活動範囲

本分科会の参加機関は当初、材料メーカー 9 社、材料ユーザー 7 社及び中立 2 機関で発足したが、途中からユーザー 2 社が追加された。本分科会の活動内容は大きく分けて次の三分野にまたがっている。

- (1) 欧米におけるクリープ破断データ外挿法に関する研究の現状に関する文献調査（約 15 件）
- (2) 2 回にわたる共同研究（ラウンドロビン試験の考え方に準じ、同じクリープ破断データを用いた外挿作業）
  - 第 1 回共同研究：指定温度・時間に対応するクリープ破断応力の外挿値の比較
  - 第 2 回共同研究：指定温度・応力におけるクリープ破断時間の内外挿値と実測値の比較
- (3) ISO 6303 の検討に基づいた外挿法の手引書の作成

## 3. 外挿法に関する内外の文献調査

近年、クリープ破断データ外挿法の発祥の地である米国を中心に、外挿法の適用をより客観的に行うために、計算機を用いることが一般的となりつつある。これは、例えば高速増殖炉における研究開発では、材料のクリープ特性を含めて設計に必要な大部分の機械的性質は計算機内のデータベースに基づき取り扱われる（design by analysis）という傾向<sup>4)</sup>を反映している。したがって、クリープ破断データの外挿においても従来の TTP 法に限らず、よりフレキシブルなモデルの適用（例えば、変数

昭和 58 年 9 月 7 日受付 (Received Sep. 7, 1983)

\* 本会高温強度研究委員会クリープ強度外挿法分科会主査 東京大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo)

\*<sup>2</sup> 本会高温強度研究委員会クリープ強度外挿法分科会幹事 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku 153)

選択型回帰分析)を指向する研究も一部で活発に行われている。特に米国においては ASME-ASTM-MPC の支持を受けて、GOLDHOFF 博士 (G. E., Schenectady) を中心とする Task Group により推進された外挿法に関する組織的な検討の成果がある<sup>5)6)</sup>。しかし、これらの活動は本分科会の発足と前後して停止している<sup>7)</sup>。一方、欧州では英国を中心に、これらの成果の中で最も一般的な TTP 法の標準化が検討され、前記の ISO 6303 に結実している。

本分科会では、まずこれらの情勢についての文献調査を行うことにより欧米の趨勢の把握をはかった。特に、我が国では一部の機関でしか用いられていなかった最適化 TTP 法を始めとする解析的な手法とその問題点を明らかにした。

#### 4. クリープ破断データの外挿及びその精度に関する共同研究

本共同研究は前記のように、同一のクリープ破断データを用いて、その整理及び外挿法に関する共通の基盤を確認するために、昭和 56 年度に 2 回にわたって実施したものである。使用データはいずれも金材技研の提供によった。

##### 4.1 2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-1Mo 鋼 (MAS) と 304H 鋼 (ABA)

###### の長時間クリープ破断強度 (第 1 回共同研究)

###### 4.1.1 使用データ

- (1) 2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-1Mo 鋼, 1 ヒート (MAS),  $n=91$   
500~650°C, 47.5~6.0 kgf/mm<sup>2</sup>  
延べ破断時間=568 205.7 h
- (2) 304H 鋼, 1 ヒート (ABA),  $n=43$   
600~825°C, 24.0~2.0 kgf/mm<sup>2</sup>  
延べ破断時間=513 795.3 h

###### 4.1.2 使用した外挿法

###### (1) 直接法

等温クリープ破断曲線を時間軸で延長する。対数破断時間 ( $\log t_R$ ) を目的変数として対数応力 ( $\log S$ ) の多項式による回帰も可能であるが、ほとんど大部分は両対数目盛のグラフ上で目視 (visual/manual) により外挿している。

###### (2) 目視 TTP 法

パラメータ定数を適当に定めて、応力に対する TTP 値をプロットして、主破断曲線を目視により描き、指定する温度・時間のパラメータ値を計算して、それに対応するクリープ破断応力値を読み取る。LM (Larson-Miller) パラメータ法で  $C=20$  とするのが一般であり、適用例も 5 機関と多い。

###### (3) パラメータ定数を最適化した TTP 法

対数破断時間の残差平方和を最小にするアルゴリズムによりパラメータ定数を一意に決定し、TTP を対数応力の多項式で回帰する。すなわち

$$TTP(Y, T_K) = b_0 + b_1 X + b_2 X^2 + \dots + b_k X^k + \varepsilon \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $Y = \log t_R$ ,  $T_K = T + 273.15$ ,  $X = \log S$ ,  $k =$  次数,  $\varepsilon =$  誤差,  $t_R =$  破断時間 (h),  $T =$  温度 (°C),  $S =$  応力 (kgf/mm<sup>2</sup>)。

TTP モデルとしては次のようなものが用いられている。

$$\text{Larson-Miller : LMP} = T_K(C+Y) \dots \dots \dots (2)$$

Orr-Sherby-Dorn :

$$\text{OSDP} = Y - Q / (4.57293 T_K) \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{Manson-Succop : MSP} = Y + B T_K \dots \dots \dots (4)$$

Manson-Haferd :

$$\text{MHP} = (Y - Y_a) / (T_K - T_a) \dots \dots \dots (5)$$

Manson-Brown :

$$\text{MBP} = (Y - Y_a) / (T_K - T_a)^r \dots \dots \dots (6)$$

White-Le May :

$$\text{WLP} = (1/T_K - 1/T_W) / (Y - Y_W) \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 $C, Q, B, T_a, Y_a, r, T_W, Y_W$  はパラメータ定数である。

###### (4) パラメータ定数を固定した TTP 法

例えば、LMP で  $C=20$  とし、(1) 式の右辺のみを計算で求める。

###### (5) その他の特殊な外挿法

Recurrence relation (Manson)

一般回帰模型 (Booker)

###### 4.1.3 あてはめ及び外挿の精度

入力したクリープ破断データと回帰曲線から計算される推定値との比較を対数破断時間の標準誤差 (SEE) から見積もり、あてはめの精度とすることができる。すなわち、

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{(n-k-1-N_p)}} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 $n =$  データ点数,  $N_p =$  TTP 中に含まれる定数の数 (LMP, OSDP 及び MSP では  $N_p=1$ , MHP では  $N_p=2$ , MBP では  $N_p=3$ )。

目視法の大きな欠点は式 (8) のようにして、精度を量的に見積もることが困難なことに解析者の主観が含まれ、外挿値にも大きな差がでやすいことである。

Table 1 に 2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-1Mo 鋼 (MAS) に対するあてはめと外挿結果の要約を示す。参加機関 (Affiliate) コードごとに使用した外挿法, SEE, 及び指定温度・時間に対応する外挿精度とそれらの基準統計量 (平均, 標準偏差, 最小値, 最大値) が与えられている。

最適化 TTP 法はパラメータ定数を一定とする方法に比べて機関ごとの予測値のばらつきが少なく、非常に有効なあてはめとなつている。Table 2 では、最適化 TTP 法によるパラメータ定数及び SEE 値を比較しているが、これらの数値は各 TTP 法ごとに、もし次数 ( $k$ )

Table 1. Results of curve fitting and extrapolation for stress rupture data of 2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-1Mo steel (MAS).

No.	Affiliate (Code)	Method	SEE	Extrapolated strength (kgf/mm <sup>2</sup> )					
				500°C 100 000 h	525°C 30 000 h	525°C 100 000 h	550°C 100 000 h	575°C 30 000 h	
1	1	LMP-2 (C=20)	0.3418	14.80	13.10	10.40	7.70	7.10	
2	4	MANUAL		15.00	13.50	11.00	8.00	7.00	
3	4	LMP-M (C=20)		14.90	13.20	10.00	7.80	7.10	
4	4	OSDP-M		14.70	13.00	10.20	7.50	6.90	
5	4	MHP-M		13.60	12.50	9.30	6.80	6.70	
6	5	LMP-M (C=20)		14.00	12.00	10.50	8.00	7.50	
7	6	LMP-4, OPT.		14.30	12.90	10.70	8.10	7.40	
8	7	MANUAL		13.80	11.80	8.50	6.90	7.20	
9	8	LMP-M (C=20)		16.00	14.00	11.00	7.40	6.60	
10	9	MANUAL		13.00	12.00	8.40	8.00	7.10	
11	9	LMP-M (C=20)		13.80	12.50	11.00	8.20	7.50	
12	10	MANUAL		13.40	12.00	9.20	7.40	6.60	
13	10	LMP-4, OPT.	0.0696	14.40	13.00	10.80	8.20	7.50	
14	10	OSDP-4, OPT.	0.0683	14.30	12.80	10.50	8.90	7.20	
15	10	MHP-4, OPT.	0.0659	13.60	12.60	10.20	7.70	7.20	
16	11	LMP-M		13.80	12.80	10.80	8.10	7.30	
17	12	MANUAL		13.00	12.30	9.00	7.50	7.50	
18	12	LMP-4, OPT.	0.1200	14.80	13.40	10.70	7.80	7.20	
19	12	OSDP-4, OPT.	0.1200	14.80	13.10	10.30	7.50	7.00	
20	13	RCV EQN		17.40	12.20	8.90	6.60	8.10	
21	14	MANUAL		13.00	13.00	9.80	7.40	6.80	
22	14	LMP-2, OPT.	0.1158	15.00	13.00	10.50	7.60	7.00	
23	14	OSDP-2, OPT.	0.1127	14.70	13.00	10.00	7.40	6.80	
24	14	MHP-3, OPT.	0.1094	14.20	13.00	9.80	7.30	6.80	
25	14	MBP-3, OPT.	0.1099	14.00	12.90	9.70	7.10	6.80	
26	15	LMP-4, OPT.	0.0760	14.50	13.00	10.70	8.00	7.30	
27	15	OSDP-5, OPT.	0.0720	14.40	12.90	10.60	7.80	7.10	
28	15	MSP-4, OPT.	0.0810	14.00	12.90	10.50	8.00	7.40	
29	16	MANUAL		13.60	13.00	10.60	7.80	7.20	
30	16	LMP-	0.1812	16.40	14.40	11.40	7.90	7.00	
31	17	LMP-M (C=20)		14.80	13.20	10.50	7.80	7.10	
32	18	LMP-1, C=20	0.3883	15.80	14.00	10.90	7.50	6.70	
33	19	MANUAL		12.70	12.10	10.30	8.40	7.00	
34	19	LMP-2, C=20	0.1159	14.80	13.30	10.50	7.80	7.10	
35	19	OSDP-2	0.1128	14.70	13.10	10.30	7.50	6.90	
Average				0.1330	14.40	12.90	10.21	7.70	7.11
Std. dev.				0.0923	0.98	0.58	0.73	0.46	0.31
Minimum				0.0659	12.70	11.80	8.40	6.60	6.60
Maximum				0.3883	17.40	14.40	11.40	8.90	8.10

Table 2. Comparison of optimized TTP constants of Larson-Miller and Orr-Sherby-Dorn parameters for stress rupture data of MAS.

TTP	Affiliate (Code)	Deg.	TTP (Constant)	SEE
LMP	10	4	20.4839	0.06966
	14	2	19.9753	0.11588
	15	4	20.360	0.076
OSDP	10	4	89.340	0.06828
	14	2	87.644	0.11275
	15	5	89.938	0.072
	19	2	87.706	0.1128

Table 3. Comparison of predicted strength by Larson-Miller and Orr-Sherby-Dorn parameters for stress rupture data of MAS.

	TTP	SEE	Extrapolated strength (kgf/mm <sup>2</sup> )				
			500°C 100 000 h	525°C 30 000 h	525°C 100 000 h	550°C 100 000 h	575°C 30 000 h
Average	LMP	0.1125	14.90	13.28	10.80	7.93	7.23
	OSDP	0.0972	14.58	12.98	10.34	7.82	7.00
Std. dev.	LMP	0.0446	0.78	0.57	0.31	0.22	0.21
	OSDP	0.0249	0.22	0.13	0.23	0.62	0.16
Min.	LMP	0.0696	14.30	12.90	10.50	7.60	7.00
	OSDP	0.0683	14.30	12.80	10.00	7.40	6.80
Max.	LMP	0.1812	16.40	14.40	11.40	8.20	7.50
	OSDP	0.1200	14.80	13.10	10.60	8.90	7.20

が同じならば一致すべきものである。

使用された TTP 法の中で共通的に用いられたものと

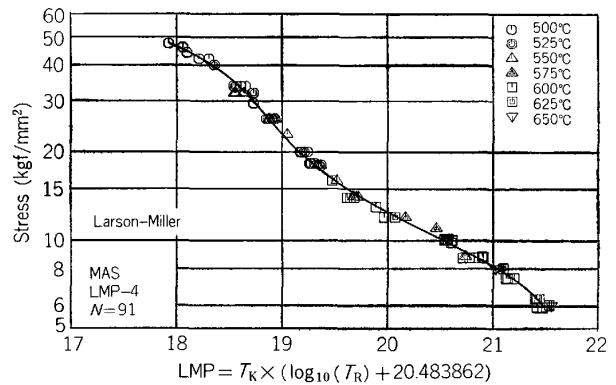


Fig. 1. Master rupture curve by optimized LMP method for a heat of 2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-1Mo steel (MAS).

しては、目視法 (直接法), LMP 法 (C=20), 最適化 LMP 法及び最適化 OSDP 法などである。これらの中で最適化 LM 及び OSD パラメータ法のみを比べると、Table 3 のようになる。

Fig. 1 は最適化 LMP 法による MAS の主破断曲線を示す。LMP, OSDP とも良いあてはめ (SEE=0.07) が可能で、これらの TTP 法による違いは、かなり小さい。

一方、304 H 鋼 (ABA) について、Table 1~3 に対

Table 4. Results of curve fitting and extrapolation for stress rupture data of SUS 304H TB (ABA). Note this heat deteriorate in longer times (Fig. 5).

No.	Affiliate (Code)	Method	SEE	Extrapolated strength (kgf/mm <sup>2</sup> )						
				600°C 100 000 h	625°C 30 000 h	625°C 100 000 h	650°C 100 000 h	675°C 30 000 h	675°C 100 000 h	
1	1	WLP-2		11.60	11.00	7.70	5.00	5.70	3.20	
2	4	MANUAL		11.50	11.00	8.00	5.00	5.80	3.50	
3	4	LMP-M		10.40	10.50	8.10	6.10	6.30	4.50	
4	4	OSDP-M		10.60	10.50	8.20	6.10	6.30	5.80	
5	4	MHP-M		11.00	11.00	8.00	4.80	6.20	2.80	
6	4	LMP-M		11.00	11.00	8.00	5.50	5.50	3.00	
7	6	LMP-M		10.40	10.50	8.10	6.10	6.30	4.50	
8	8	LMP-M		12.00	9.60	9.00	6.80	6.00	5.40	
9	9	MANUAL		11.50	*****	*****	5.00	*****	*****	
10	9	LMP-M (C=13)		10.00	10.20	8.00	6.00	6.10	4.40	
11	9	LMP-M (C=15)		11.40	11.00	8.50	6.40	7.00	5.00	
12	10	MBP-5, OPT.	0.0893	10.07	10.90	6.84	4.50	5.90	2.81	
13	10	MHP-5, OPT.	0.0934	10.94	10.95	7.75	5.06	5.95	3.28	
14	10	OSDP-3, OPT.	0.1812	10.66	10.63	8.23	6.12	6.30	4.40	
15	11	LMP-M (C=17)		11.50	10.70	8.10	4.60	5.50	2.60	
16	12	MANUAL		12.00	11.40	7.50	4.00	6.00	2.80	
17	12	REG. MODEL	0.0760	11.50	11.10	7.90	4.75	6.00	2.43	
18	12	OSDP-4, OPT.	0.1800	10.60	10.60	8.20	6.10	6.32	4.40	
19	12	LMP-4, OPT.	0.2100	10.30	10.30	8.05	6.15	6.30	4.55	
20	13	RCV EQN		8.50	*****	*****	2.80	*****	*****	
21	14	MANUAL		11.30	10.90	7.40	4.80	5.50	2.85	
22	14	MHP-3, OPT.	0.1411	11.00	11.00	8.10	5.70	6.50	3.60	
23	14	MBP-3, OPT.	0.1151	11.00	11.00	8.10	5.70	6.40	3.50	
24	14	OSDP-3, OPT.	0.1812	10.80	10.80	8.40	6.20	6.40	4.50	
25	14	LMP-3, OPT.		10.50	10.60	8.20	6.20	6.30	4.60	
26	15	OSDP-6, OPT.		10.50	10.40	8.10	6.20	6.30	4.60	
27	15	LMP-6, OPT.		10.10	10.20	8.20	6.30	6.50	4.30	
28	15	MSP-6, OPT.	0.2444	9.70	10.00	8.00	6.10	6.50	4.20	
29	16	LMP-2, OPT.	0.2223	9.98	10.07	7.91	6.16	6.31	4.71	
30	17	LMP-M		11.30	9.90	9.00	6.90	6.80	5.10	
31	18	LMP-1, (C=17)	0.3880	10.90	10.60	8.79	7.06	6.92	5.67	
Average				0.1768	10.79	10.63	8.08	5.62	6.20	4.03
Std. dev.				0.0865	0.74	0.42	0.43	0.93	0.38	0.96
Minimum				0.0760	8.50	9.60	6.84	2.80	5.50	2.43
Maximum				0.3880	12.00	11.40	9.00	7.06	7.00	5.80

Table 5. Comparison of optimized TTP constants of Larson-Miller and Orr-Sherby-Dorn parameters for stress rupture data of ABA. Note optimized values of TTP constant are considerably smaller than ordinary heats due to the deterioration.

TTP	Affiliate (Code)	Deg.	TTP (Constant)	SEE
LMP	10	3	13.1865	0.21386
	12	4	13.20	0.21
	14	3	13.1778	0.21340
	15	6	13.0296	0.23184
OSDP	10	3	76.092	0.18122
	12	4	76.000	0.18
	14	3	76.068	0.18121

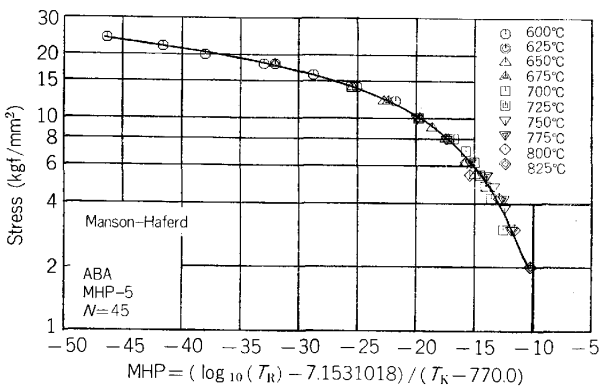


Fig. 2. Master rupture curve by optimized TTP method of Manson-Haferd (MHP) for a heat of 304H steel (ABA). Note that this heat deteriorates in longer times.

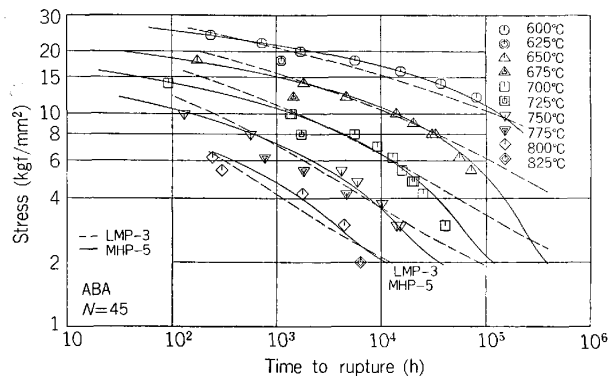


Fig. 3. Comparison of data with predicted curves by LMP and MHP for ABA. Solid lines represent the prediction by MHP; dashed lines represent the prediction by LMP.

応するものが Table 4~5 である。このクリープ破断データは高温・長時間側で著しい劣化が認められ、線型 TTP (LMP, OSDP, MSP など) では最適化を行っても SEE が 0.18 より小さくならず、Fig. 2 及び 3 に示すように MHP や MBP のような非線型 TTP を用いる必要がある。LMP で C=20 を用いる方法は、このような場合、極めて不十分なあてはめとなる。

一部の参加機関では、クリープ破断データを一定の試験時間 ( $t_R=3000$  h または  $10000$  h) で二分し、短時間データのみを用いて、計算された主破断曲線の式を用いて外挿し、前記 SEE に対応する統計量

Table 6. Comparison of curve fitting and extrapolation by the short-time data for 2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-1Mo steel and 304H steel.

2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> Cr-1Mo steel (MAS)						304H steel (ABA)					
TTP	Affiliate (Code)	Deg.	TTP (Constant)	SEE	RMS	TTP	Affiliate (Code)	Deg.	TTP (Constant)	SEE	RMS
LMP	10	4	20.6764	0.0726	0.0767	LMP	10	3	19.8818	0.0897	0.3597
	14	2	21.0600	0.1853	0.62						
	15	4	20.773	0.076	0.117		12	4	18.2311	0.10	0.6325
OSDP	10	4	89530	0.0742	0.0430	OSDP	10	3	99650	0.0638	0.2543
	14	2	90820	0.1477	0.50						
	15	4	89946	0.126	0.224		12	4	96400	0.08	0.5400
MSP	10	4	0.02809	0.0780	0.1004	MSP	10	1	0.023517	0.1064	0.3270
	15	4	0.0283	0.081	0.126						
MHP	10	4	240	0.071		MHP	10	4	630	0.0405	
	14	2	19.5818				10.5916				
			525				805				
		11.6079	6.45186								

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_L} (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{(n_L - 1)}}$$

を計算して、外挿精度の尺度としている (Table 6). ただし、 $n_L$  は 3000 h あるいは 10000 h 以上のデータ点数. Fig. 4 は MAS について、全部のデータを用いた OSD パラメータ法によるあてはめと 3000 h 以下のデ

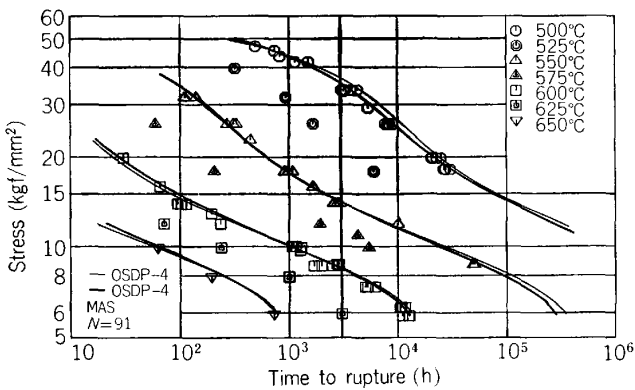


Fig. 4. Comparison of the extrapolation by OSDP using the data less than 3000 h and all data of MAS. Thin lines represent the prediction from short time data; thick lines are from all data.

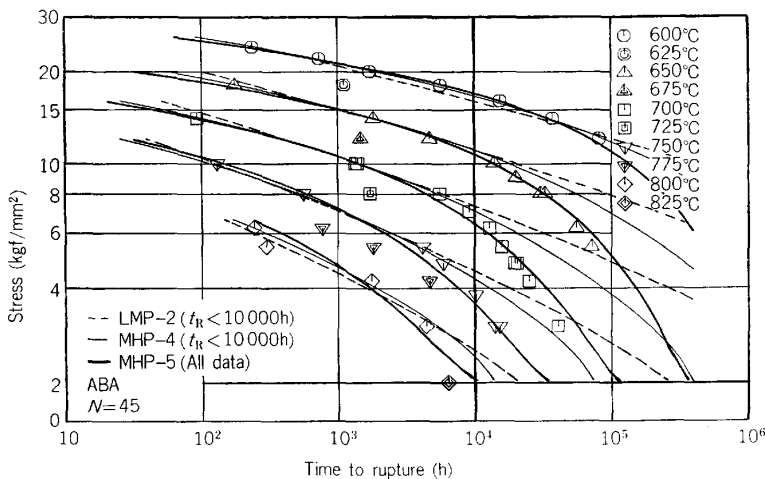


Fig. 5. Comparison of the extrapolation by LMP and MHP using the data less than 10000h of ABA. Solid lines represent prediction by MHP; dashed lines are by LMP. Thin lines represent prediction by MHP using all data points.

ータによる外挿曲線との比較を示す. この例では、3000 h 以下のデータのみを用いてもかなり良い精度で外挿が可能であることがわかる. しかしながら、長時間強度が劣化した ABA では Fig. 5 に示すように、非線型 TTP を用いた場合でも長時間外挿の精度はかなり低い. 各種の TTP 法によるあてはめ性を比較 (Fig. 6) すると、一般に TTP 法間の違いは小さいが、LMP の方が OSDP よりやや精度が劣り、外挿値のばらつき (Fig. 7, 8) も大きいことがわかる. 長時間強度の外挿を良い精度で行うためには、まずデータのあてはめ性 (SEE) が十分に良いことが必要であり、この観点からは最適化 TTP 法の適用が有効である. ただし、長時間強度が劣化し、クリープ破断曲線に急激な変化が現れるような場合は、短時間データのみによつて良いあてはめを行うことができたとしても、長時間側の劣化を正しく予測することは不可能で、一般的には実際よりかなり高い長時間強度の外挿値が得られる.

4.1.4 第1回共同研究のまとめ

(1) 2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-1Mo 鋼 (MAS) については LM や OSD のような簡単な TTP により比較的良好的な精度であてはめ及び外挿が可能である.

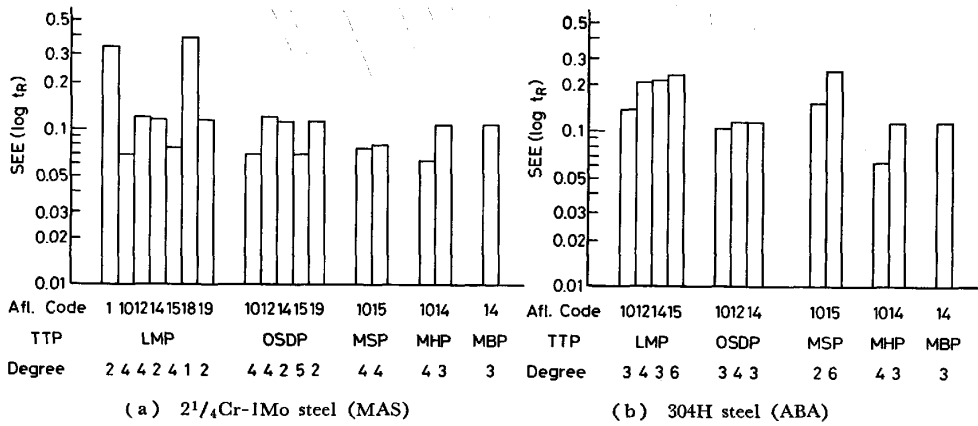


Fig. 6. Accuracy of fit by various TTP methods.

(2) 長時間強度が劣化した 304 H 鋼 (ABA) については, Manson-Haferd のような非線型 TTP により, あてはめについては満足すべき精度が得られるが, 外挿は極めて不十分な精度となる。

(3) 目視法によるクリープ破断データのあてはめ及び外挿は, 解析者の主観的な要素が入るため, 外挿値に

大きな差が出る。

(4) 対数破断時間の残差平方和が最小となるようにパラメータ定数を定める, いわゆる最適化 TTP 法は客観性の上で標準的な外挿法と考えられるが, その計算法 (アルゴリズム) の詳細が普及していないため, 機関ごとの計算値が一致していない。

(5) パラメータ定数を最適化した LM と OSD<sub>2</sub> を比較すると, 一般的に OSD の方が良いあてはめ性を示し, 外挿値も控え目となる。

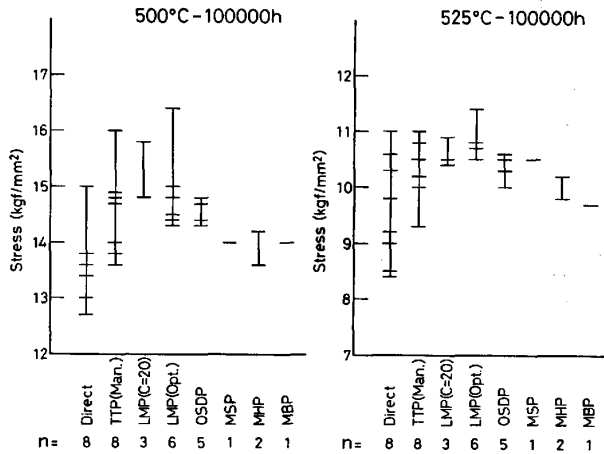


Fig. 7. Comparison of 100 000h strength extrapolated by various methods for MAS.

4.2 STBA 20 及び SCMV 3-NT のクリープ破断データの外挿精度 (第 2 回共同研究)

4.2.1 使用データ

- (1) STBA 20 (1/2Cr-1/2Mo 鋼管) NRIM/CDS/No. 20 (1976) MFF
- (2) SCMV3-NT (1 1/4Cr-1/2Mo-Si 鋼板) NRIM/CDS/No. 21 (1976) MhA

4.2.2 結果

本共同研究では, 短時間側のデータに基づいた主破断曲線を外挿して, 実測の長時間データと比較し, 4.1.3 で述べた RMS 値を計算して TTP 法による外挿精度のチェックを主眼としている。

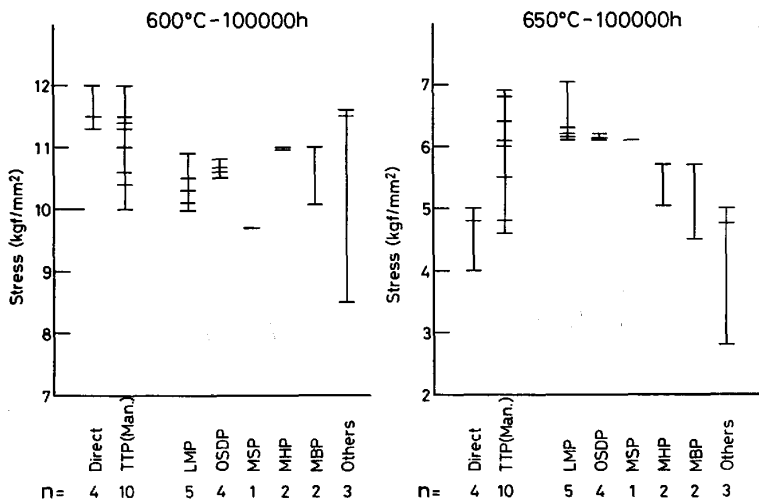


Fig. 8. Comparison of 100 000h strength extrapolated by various methods for ABA.

Table 7 は MFF 全データについての総括表であり、各参加機関ごとに使用した外挿法、あてはめの精度 (SEE), 外挿精度 (RMS) 及び対数破断時間の実測値と外挿値の比較を示す。各参加機関により比較的共通的に用いられた最適化 LMP 法による外挿値の要約を Table 8 に示す。パラメータ定数や対数破断応力による主破断曲線の次数の決定法に不一致があるために、外挿値にも大きな違いが出ている。

第 1 回の共同研究の場合と同じく、複数の外挿法を用いた参加機関も多い。本例のような低合金鋼のクリープ破断データの中で、450~500°C の高応力試験による極短時間データは、非常に大きなばらつきを示すため、あてはめ及び外挿の精度はこれらの影響を受けて、みかけ上かなり大きな SEE や RMS 値を示している。このため一部の参加機関では、このような非クリープ域にある

と思われる極短時間データを除外することにより、少なくともあてはめ性についてはかなり改善が可能であることを指摘している。

MFF の 100 h 未満のクリープ破断データを除外したもののについての最適化 TTP 法による外挿値、LM 法と OSD 法を比べるとあてはめ性は LM パラメータ法が良好であるが、RMS は両方法ともに SEE よりかなり大きく、外挿曲線の傾向 (Fig. 9) をみると、これは主として 40 kgf/mm<sup>2</sup> 以上の高応力側の予測がはずれるためであることがわかる。このように非クリープ域のデータを含む場合の対応としては、低温・高応力側のデータの取捨選択を行うことが有効である。Table 9 及び 10 は、このような観点での整理結果である。いずれのケースでも最適化 TTP 法を採用すれば TTP 法の違いによる予測値の差はあまり大きくないといえる。

Table 7. Results of curve fitting and extrapolation for stress rupture data of STBA 20 (1/2Cr-1/2Mo steel tube, MFF).

No.	Affiliate (Code)	Method	SEE	RMS	Extrapolated log <sub>10</sub> (time to rupture)			
					450°C 42.0 kgf/mm <sup>2</sup>	450°C 38.0 kgf/mm <sup>2</sup>	500°C 20.0 kgf/mm <sup>2</sup>	550°C 7.0 kgf/mm <sup>2</sup>
		[Actual log <sub>10</sub> (time to rupture)]			→ 4.4368	4.7236	4.4785	4.6960
1	1	LMP-4, OPT.	0.4064	0.5816	3.8221	4.5116	4.5757	4.8485
2	2	MANUAL		0.2066	4.5062	4.8865	4.4014	4.4502
3	2	LMP-3, (C=20)	0.4442	0.7844	3.5201	4.0858	4.5175	4.4799
4	4	OTHER		0.0956	4.4594	4.7917	4.5441	4.4914
5	5	LMP-M		0.1729	4.4698	4.9128	4.6532	4.6053
6	9	LMP-M		0.2865	4.5090	4.7718	4.3134	4.6289
7	9	LMP-M		0.1708	4.3264	4.7690	4.5640	4.7606
8	10	LMP-3, OPT.	0.4265	0.7041	3.6540	4.2938	4.7536	4.6713
9	10	OSDP-3, OPT.	0.4330	0.6798	3.7005	4.3552	4.7805	4.5580
10	10	MSP-3, OPT.	0.4339	0.7681	3.5477	4.1315	4.6910	4.6533
11	13	OSDP-M		0.2630	4.4400	4.8400	4.5900	4.3800
12	15	LMP-4, OPT.	0.4068	0.6008	3.8207	4.5120	4.5939	4.8388
13	15	OSDP-5, OPT.	0.4115	0.4717	3.9927	4.6953	4.5630	4.7265
14	15	MSP-4, OPT.	0.4138	0.6614	3.7021	4.3415	4.5284	4.8312
15	15	MHP-5, OPT.	0.4118	0.5577	3.9268	4.6099	4.5356	4.6024
16	16	MANUAL		0.1117	4.4771	4.8451	4.4548	4.4771
17	16	LMP-2, OPT.	0.4573	0.5591	4.0573	3.5245	4.5891	4.7444
18	17	MANUAL		0.2200	*****	*****	4.4800	4.5763
19	17	LMP-M		0.2003	4.4639	4.9065	4.7573	4.9057
20	17	LMP-6, OPT.	0.3399	0.4224	4.8911	4.4393	4.7198	5.1440
21	19	MANUAL		0.3692	4.8451	*****	4.4624	4.1761
22	19	LMP-4, OPT.	0.4560	0.6789	3.6812	4.3324	4.7482	4.6866
23	19	OSDP-4, OPT.	0.4240	0.6513	3.7324	4.3979	4.6812	4.5798
		Average	0.4204	0.4443	4.1157	4.5216	4.5869	4.6442
		Std. dev.	0.0298	0.2306	0.4300	0.3451	0.1224	0.2012
		Minimum	0.3399	0.0956	3.5201	3.5245	4.3134	4.1761
		Maximum	0.4573	0.7844	4.8911	4.9128	4.7805	5.1440

Table 8. Results of extrapolation by optimized Larson-Miller parameter for all data of MFF.

	SEE	RMS	Extrapolated log <sub>10</sub> (time to rupture)				
			450°C 42.0 kgf/mm <sup>2</sup>	450°C 38.0 kgf/mm <sup>2</sup>	500°C 20.0 kgf/mm <sup>2</sup>	550°C 7.0 kgf/mm <sup>2</sup>	
			[Actual log <sub>10</sub> (time to rupture)]	→ 4.4368	4.7236	4.4785	4.6960
Average	0.4155	0.5911		3.9877	4.2689	4.6634	4.8223
Std. dev.	0.0433	0.1001		0.4651	0.3757	0.0855	0.1742
Minimum	0.3399	0.4224		3.6540	3.5245	4.5757	4.6713
Maximum	0.4573	0.7041		4.8911	4.5120	4.7536	5.1440

Table 9 及び Fig. 10 から、10000 h 以下のデータからの外挿についても極短時間 (100 h 未満) データの無視が有効であることがわかる。

次に、SCMV3-NT についての結果であるが、最適化 TTP 法を用いれば、あてはめ及び外挿の両方について、

実用的にも十分満足すべき精度が得られている。

全体として、第 1 回の共同研究の場合より、最適化 TTP 法を採用した参加機関が多く、ほとんど同一の結果を得ているケースもあったが、パラメータ定数や次数の決定の細部には不一致がある。

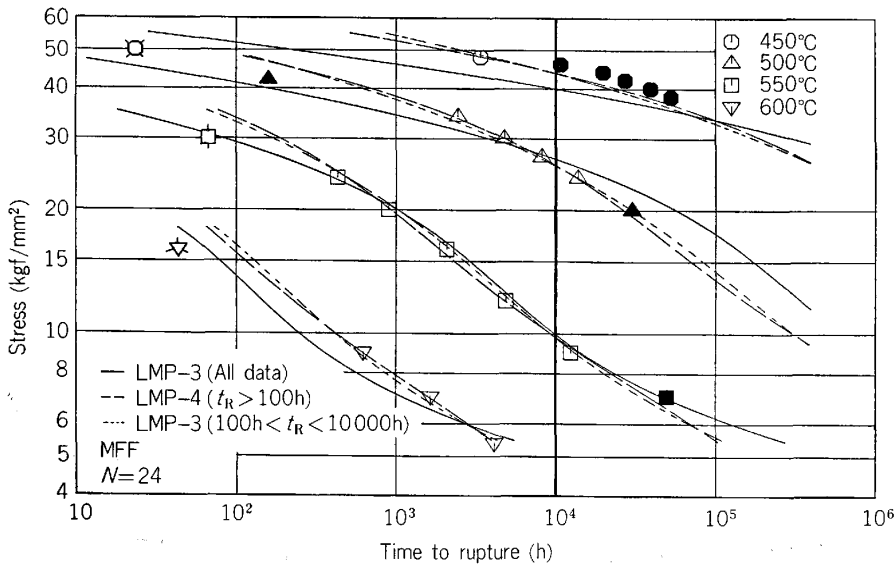


Fig. 9. Comparison of data with predicted curves by Larson-Miller parameter. Note that the prediction using short-time data (whiskered) points is poor. Some data (closed) points were not accounted for the calculation.

Table 9. Results of curve fitting and extrapolation for the stress rupture data over 100 h and less than 10 000 h of MFF.

No.	Affiliate	Method	SEE	RMS	Extrapolated log <sub>10</sub> (time to rupture)				
					450°C 42.0 kgf/mm <sup>2</sup>	450°C 38.0 kgf/mm <sup>2</sup>	500°C 20.0 kgf/mm <sup>2</sup>	550°C 7.0 kgf/mm <sup>2</sup>	
[Actual log <sub>10</sub> (time to rupture)]					→	4.4368	4.7236	4.4785	4.6960
1	6	LMP-4, OPT.	0.0332	0.2515	4.2041	4.6149	4.4564	4.6444	
2	6	OSDP-4, OPT.	0.0395	0.2131	4.2430	4.6684	4.4742	4.5623	
3	6	MSP-4, OPT.	0.0339	0.3119	4.1303	4.4914	4.3997	4.6693	
4	6	MHP-4, OPT.	0.0359	0.2712	4.1644	4.5403	4.4216	4.5888	
5	10	LMP-3, OPT.	0.0742	0.2842	4.1461	4.5151	4.4783	4.5348	
6	10	OSDP-4, OPT.	0.0354	0.2132	4.2425	4.6688	4.4749	4.5619	
7	10	MSP-3, OPT.	0.0827	0.3518	4.0674	4.3872	4.4175	4.5382	
8	10	MHP-4, OPT.	0.0278	0.2631	4.1634	4.5414	4.4205	4.5901	
9	12	LMP-3, OPT.	0.1252	0.1867	4.2553	4.6990	4.7924	4.5382	
10	12	OSDP-3, OPT.	0.1292	0.1578	4.2788	4.7634	4.6990	4.6628	
11	12	MSP-3, OPT.	0.1226	0.2646	4.1303	4.5185	4.6021	4.7782	
12	14	LMP-3, OPT.	0.0741	0.2628	4.1428	4.5158	4.4819	4.5308	
13	14	OSDP-5, OPT.	0.0325	0.1826	4.2665	4.6875	4.4431	4.5172	
14	14	MHP-3, OPT.	0.0371	0.2195	4.2381	4.6309	4.3936	4.4267	
15	14	MBP-3, OPT.	0.0861	0.2714	4.1367	4.5004	4.4706	4.4990	
Average					4.1873	4.5829	4.4888	4.5931	
Std. dev.					0.0374	0.0635	0.0987	0.1006	
Minimum					4.0674	4.3872	4.3936	4.4267	
Maximum					4.2788	4.7643	4.6990	4.7924	

Table 10. Comparison of the extrapolation by Larson-Miller and Orr-Sherby-Dorn parameters for the stress rupture data over 100h and less than 10 000h of MFF.

	TTP	SEE	RMS	Extrapolated log <sub>10</sub> (time to rupture)					
				450°C 42.0 kgf/mm <sup>2</sup>	450°C 38.0 kgf/mm <sup>2</sup>	500°C 20.0 kgf/mm <sup>2</sup>	550°C 7.0 kgf/mm <sup>2</sup>		
[Actual log <sub>10</sub> (time to rupture)]					→	4.4368	4.7236	4.4785	4.6960
Average	LMP	0.0767	0.2463	4.1871	4.5862	4.5289	4.6256		
	OSDP	0.0591	0.1917	4.2577	4.6970	4.5228	4.5760		
Std. dev.	LMP	0.0377	0.0420	0.0353	0.0886	0.1139	0.1230		
	OSDP	0.0468	0.0268	0.0179	0.0452	0.1184	0.0616		
Minimum	LMP	0.0332	0.1867	4.1428	4.5151	4.4564	4.5308		
	OSDP	0.0325	0.1578	4.2425	4.6684	4.4431	4.5172		
Maximum	LMP	0.1252	0.2842	4.2553	4.6990	4.6990	4.7924		
	OSDP	0.1292	0.2132	4.2788	4.7634	4.6990	4.6628		

4.2.3 第2回共同研究のまとめ

(1) 低温高応力試験による極短時間データは非クリップ域のため、ばらつきが大きく、TTP法の適用に当

たつては無視することが必要な場合がある。

(2) 最適化 TTP 法のアルゴリズムは参加機関の約半数で採用されているが、細部に不一致がある。



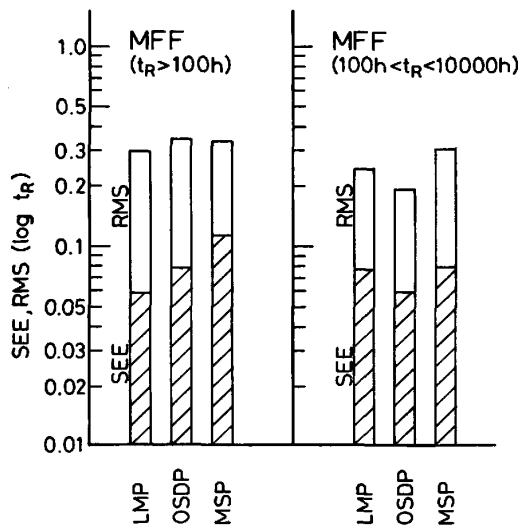


Fig. 10. Accuracy of fit and extrapolation by linear TTP methods for MFF.

(3) 標準的な最適化 TTP 法 (LM, OSD, MS) 間には予測値にあまり大きな違いは生じないが、これらの中では OSD による外挿値は一般に控え目となる。

(4) 標準的な最適化 TTP 法によるあてはめの精度 (SEE) は、1 ヒートからのバランスの良いクリープ破断データについては、特別な場合を除き約 0.1 以下とすることができ、実用上十分な精度でクリープ破断データを表現できる。

(5) 外挿の精度は、一般にあてはめ性より劣るが、最良の場合は、ほぼ満足すべき精度が得られた。最適化 TTP 法の中では MH がすぐれている。

### 5. クリープ破断データ外挿法の手引書作成

これまで、クリープ破断試験のデータを整理するための方法として JIS にはないが外国規格の中で推奨されているものとしては、Larson-Miller, Manson-Haferd, 及び Manson-Brown パラメータ法である。ASTM 規格ではこれらの TTP 法について簡単な説明と原論文が引用されている。前記 ISO 6303 では、その付属文書として Manson-Brown 法の適用手順が述べられている。しかし、これらはいずれも具体例が示されていない。そこで本分科会では、共同研究の成果を踏まえて、最近のコンピュータ利用データ解析を意識した外挿法の手引書を作成することにした。そのために、数名からなるワーキンググループを組織し、以下のような方針の下に作業を進め昭和 58 年 7 月当協会より刊行した<sup>9)</sup>。

- 1) ISO 6303 に準拠した整理法を基礎とすること。
- 2) 目視 Larson-Miller 法を始めとする、わが国におけるクリープ破断データ外挿法の現状を加味すること。
- 3) コンピュータの利用を前提とした外挿法の数式的計算手順を含めること。
- 4) 複数の具体例を示すこと。

### 6. 結 言

耐熱鋼及び合金の長時間クリープ特性値の予測を正しく行うための、理論的な根拠はいまだに不十分であるが、高温材料の研究開発及び高温用機器の設計や保守に占める外挿法の役割は大きい。本分科会の活動は、TTP 法を中心とする外挿法に関して、精度の定量的な評価を含めてより客観的に行えるような共通的な基盤を提供しつつあると考えられる。高温強度及び寿命の推定における精度と信頼性の向上は密接な関係にあり、新しい外挿法に関するさまざまな試みがわが国で活発になることを期待したい。

最後に、本分科会の活動に当たり、日本鉄鋼協会大曾根弘毅氏には事務局幹事としてご尽力されたことに対し厚くお礼申し上げます。また、本稿の準備に協力された金属材料技術研究所 坂本正雄技官に謝意を表します。

### 文 献

- 1) Time-Temperature Parameters for Creep-Rupture Analysis, ASM Publ. No. D8-100, ed. by R. M. GOLDHOFF (1968) [ASM]
- 2) J. B. CONWAY: Stress-Rupture Parameters: Origin, Calculation and Use (1969) [Gordon and Breach]
- 3) 横井 信, 門馬義雄: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 831
- 4) 加納 巖, 和田雄作, 上嶋裕和: FUJITSU, 34 (1983), p. 637
- 5) Characterization of Materials for Service at Elevated Temperatures, MPC-7, ed. by G. V. SMITH (1978) [ASME]
- 6) J. Eng. Mat. and Tech. (Trans. ASME), 101 (1979) Oct.; GOLDHOFF issue: Materials at Elevated Temperature
- 7) C. R. BRINKMAN (ORNL): 著者の一人 (門馬) への私信 (1982 年 2 月)
- 8) ANSI/ASTM E 139-70
- 9) 藤田利夫, 門馬義雄, 松崎明博, 木原重光, 志賀正男, 笠原晃明: 「ISO 6303 に準拠したクリープ破断データ外挿法の手引 (第 1 版)」(1983 年 7 月) [日本鉄鋼協会]