

黒心可鍛鑄鉄の高温強度

High Temperature Properties of Malleable Cast Iron

佐々木 良 一* 篠田 哲 守**
 Ryôichi Sasaki Tetsumori Shinoda
 志賀 正 男** 満谷 隆***
 Masao Shiga Takashi Mitsutani

要 旨

ボイラ付属設備材料として広く使用されている黒心可鍛鑄鉄の高温強度を明らかにするため、FCMB28 (3溶解材)、FCMB32 (1溶解材)、FCMB35 (5溶解材) について 300~500°C で、高温引張試験および 10~13,700 時間までのクリープ破断試験を行ない、回帰分析手法を用いて強度のばらつきおよび 100,000 時間強度の推定を行なった。黒心可鍛鑄鉄のクリープ域は約 380°C 以上で、これ以下の温度では引張強さが許容応力を支配することを明らかにし、また 380°C 以上で使用する場合の許容応力についても一応の根拠を得た。

1. 緒 言

黒心可鍛鑄鉄はボイラ付属設備材料として広く使用されており、近年その使用制限温度も 230°C から 350°C に引き上げられた。しかし、その高温強度については若干の報告はあるが^{(1)~(3)}、長時間のクリープ破断データはきわめて乏しい。筆者らのひとりにはさきに FCMB 28 相当材の高温強度を調べ、黒心可鍛鑄鉄は 350°C まで十分使用できることを明らかにしたが⁽⁴⁾、クリープ破断強度は同一鋼種間であってもかなりばらつくのが普通で、信頼度の高いクリープ破断強度を求めるにはそのばらつきを検討しなければならない。そこで FCMB 28 (3溶解材)、FCMB 32 (1溶解材)、FCMB 35 (5溶解材) について 300~500°C で 10~13,700 時間までのクリープ破断試験を行ない、回帰分析手法を用いて強度のばらつきおよび 100,000 時間強度の推定を行なうことにした。

2. 実 験

2.1 試 料

黒心可鍛鑄鉄 FCMB28 相当材 3 溶解、FCMB32 相当材 1 溶解および FCMB35 相当材 5 溶解、計 9 溶解の試料を実験に供した。地金の配合は高ケイ素鉄 8%、鋼くず 40%、もどしくず 52% とし、キューボラと電気炉の二重溶解法によって得た溶湯を図 1 に示す鑄造方案の生砂型に鑄込、同図中のキールブロック型の白鉄素材を作り、これに所定の可鍛化焼鈍を施し、キールブロックの底部より図 2 に示す各種試験片を採取した。表 1 は試料の化学組成を示したものである。

2.2 引張試験

20 t アムスラ試験機を用い FCMB28 については室温 ~550°C、

表 1 供試材料の化学組成 (%)

供試材料	C	Si	Mn
FCMB 28 No. 1	2.93	1.23	0.33
No. 2	2.89	1.25	0.42
No. 3	2.55	1.15	0.38
FCMB 32 No. 1	2.93	1.49	0.51
FCMB 35 No. 1	2.65	1.44	0.42
No. 2	2.57	1.48	0.40
No. 3	2.50	1.58	0.43
No. 4	2.55	1.39	0.44
No. 5	2.51	1.42	0.46

* 日立製作所日立研究所 工学博士
 ** 日立製作所日立研究所
 *** 日立金属株式会社桑名工場

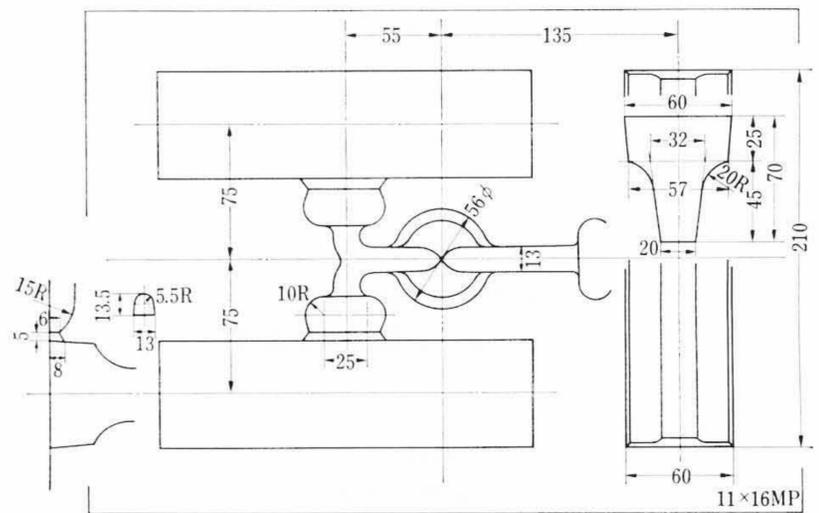


図 1 試験片の鑄造方案

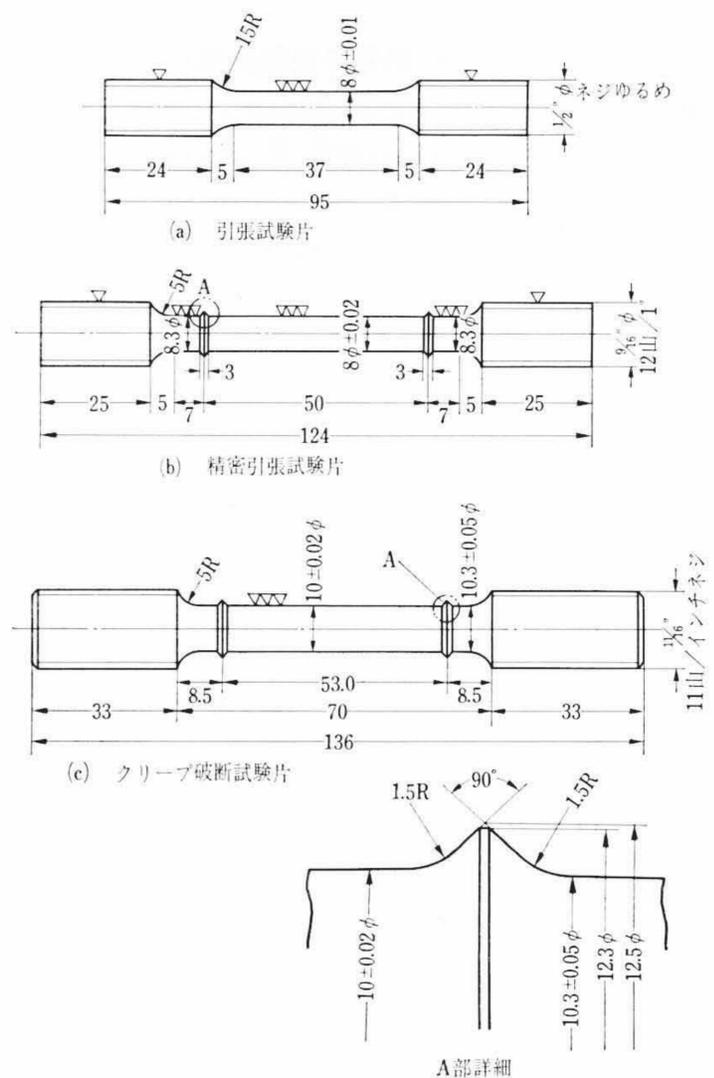


図 2 試験片の寸法

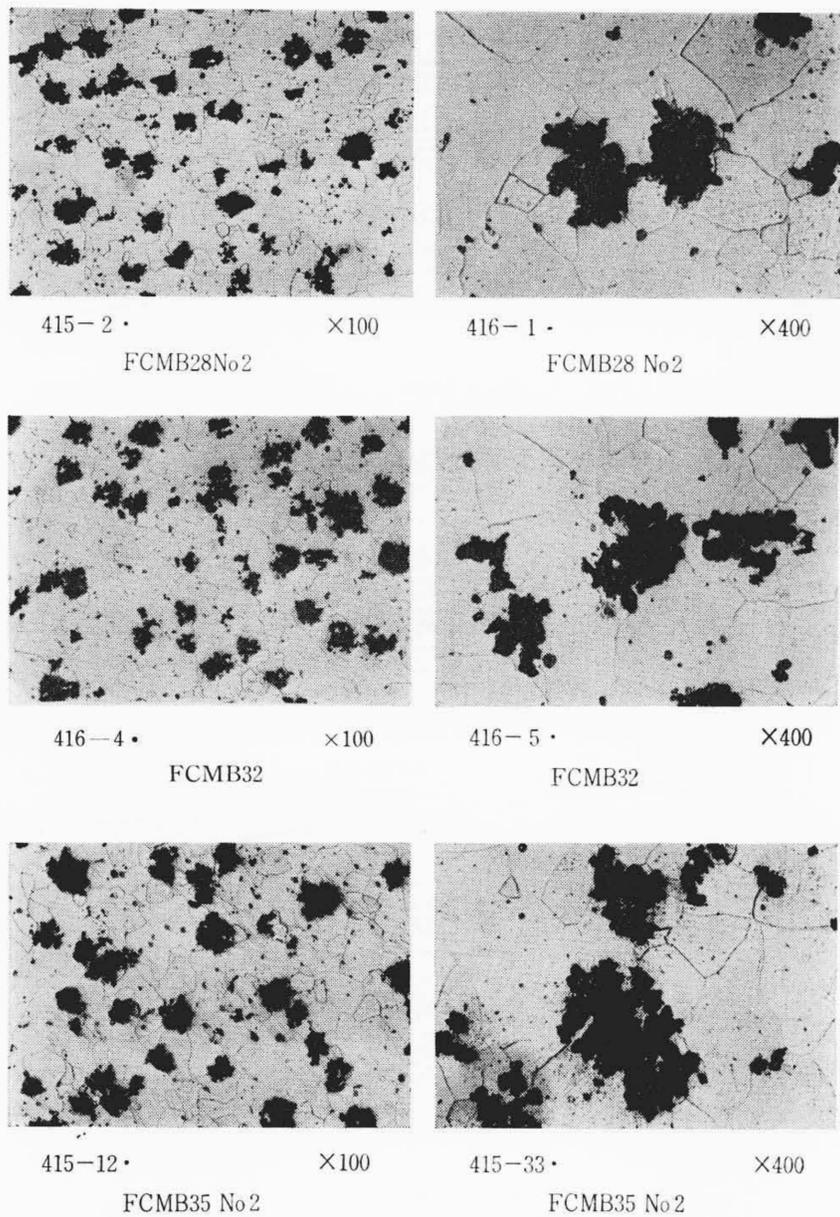


図3 試料の顕微鏡組織

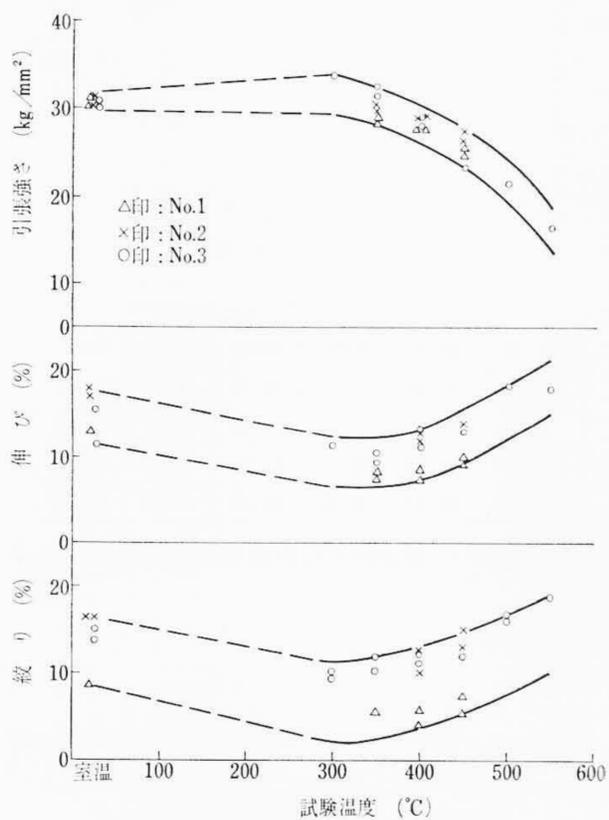


図4 FCMB28の高温引張試験結果

FCMB 32 については室温 ~450°C, FCMB 35 については室温 ~500°C で試験した。

2.3 クリープ破断試験

東京衡機製造所製 C-3形クリープ破断試験機を用い, 300~500°C で試験した。これらの結果を応力-破断時間線図および Larson & Miller 法による Master 破断曲線で整理し, 平均クリープ破断強度

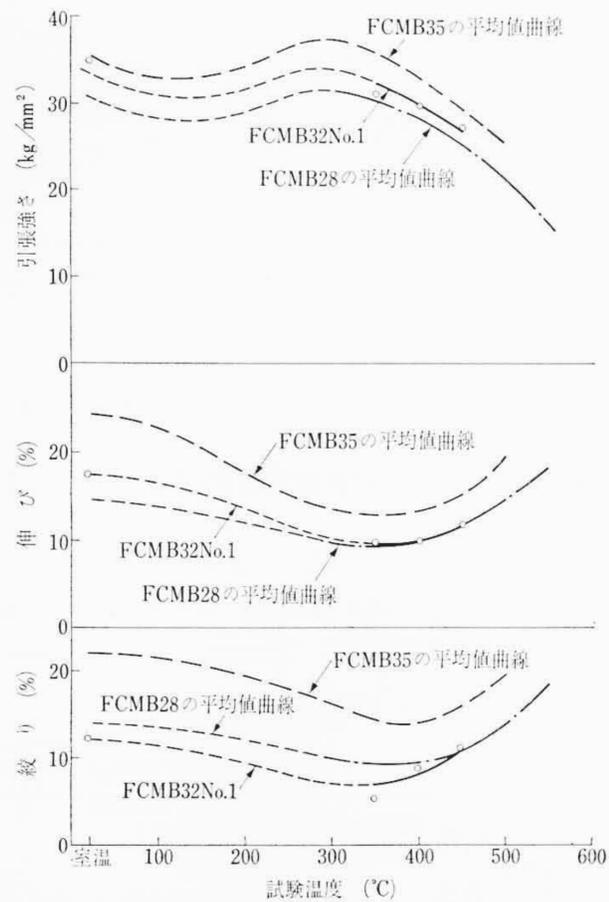


図5 黒心可鍛鋳鉄の高温引張試験結果

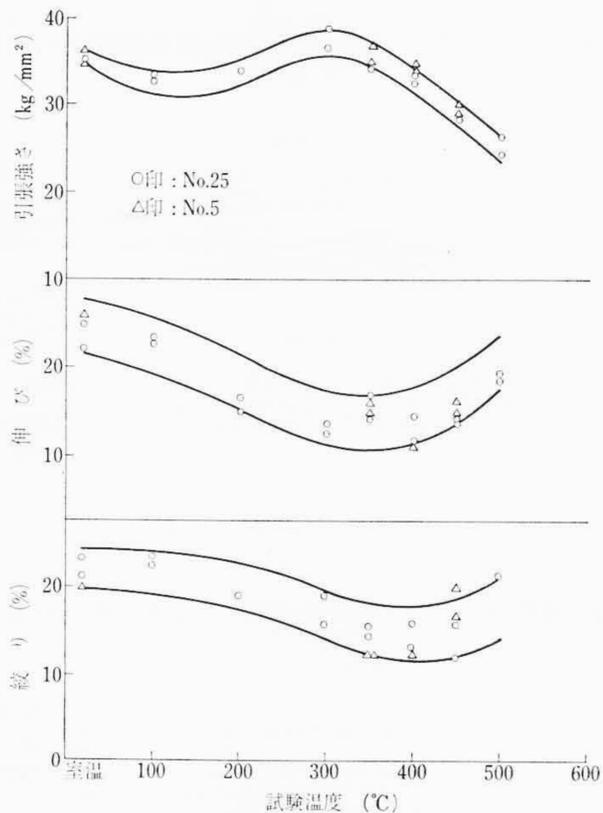


図6 FCMB35の高温引張試験結果

および強度のばらつきを求めた。

クリープ破断強度の平均値および95%信頼限界は回帰分析手法によって求め, 回帰分析には応力-破断時間線図および Larson & Miller 法の Master 破断曲線のあてはめを次の8個の式を用い比較した。

(1) (1)および(2)式

指定破断時間に対する破断応力σは対数正規分布をすると仮定し, logσを確率変数, logtを指定変数と考えて次の1次式および2次式で回帰を行なった。

$$\log \sigma = \alpha_1 + \alpha_2 (\log t) \dots \dots \dots (1)$$

$$\log \sigma = \alpha_1 + \alpha_2 (\log t) + \alpha_3 (\log t)^2 \dots \dots \dots (2)$$

ここに, t: 破断時間 (h)

σ: 応力 (kg/mm²)

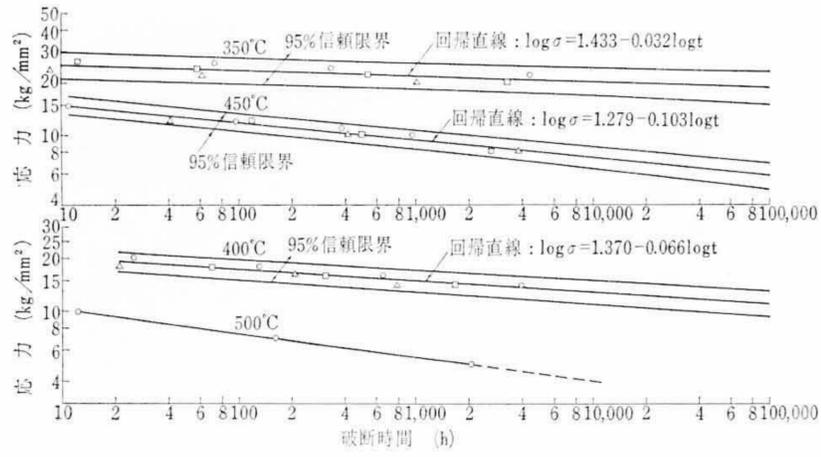


図7 FCMB28の応力-破断時間線図(1次回帰)-(1)式一

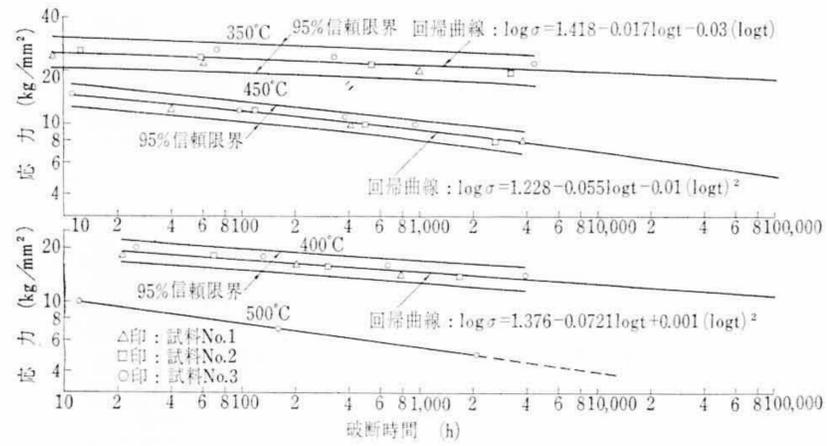


図8 FCMB28の応力-破断時間線図(2次回帰)-(2)式一

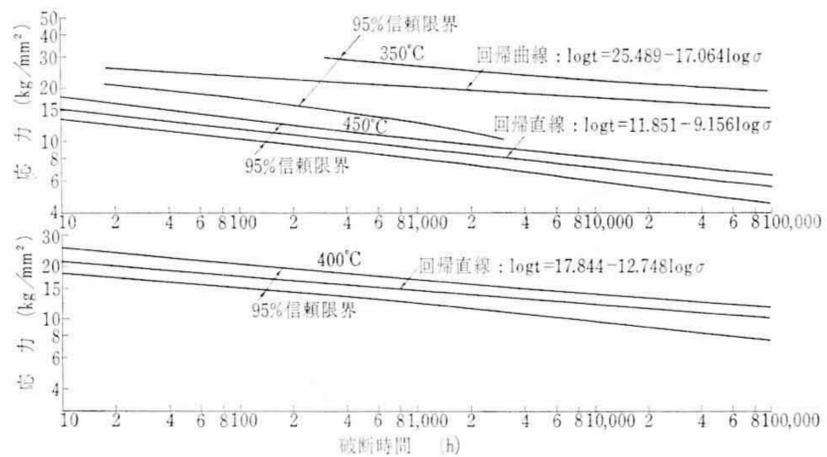


図9 FCMB28の応力-破断時間線図(1次回帰)-(3)式一

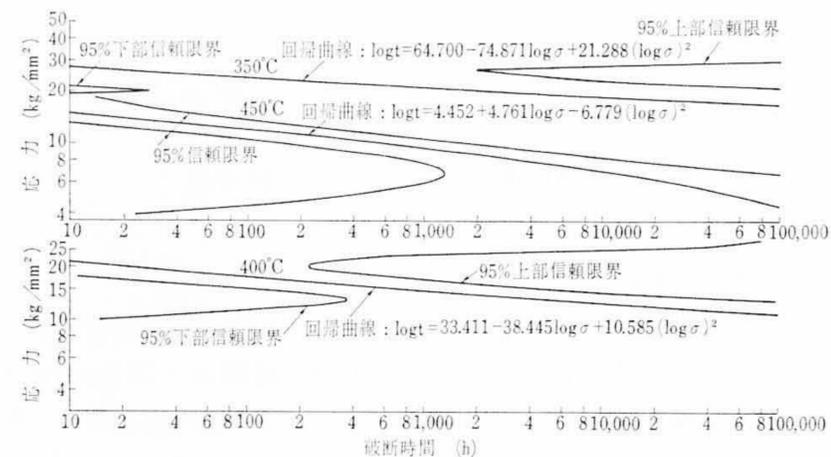


図10 FCMB28の応力-破断時間線図(2次回帰)-(4)式一

(2) (3)および(4)式

一定応力のもとでは破断時間は対数正規分布をするものと仮定し、 $\log t$ を確率変数、 $\log \sigma$ を指定変数と考えて次の1次式および2次式で回帰を行なった。

$$\log t = \alpha_1 + \alpha_2 (\log \sigma) \dots\dots\dots (3)$$

$$\log t = \alpha_1 + \alpha_2 (\log \sigma) + \alpha_3 (\log \sigma)^2 \dots\dots\dots (4)$$

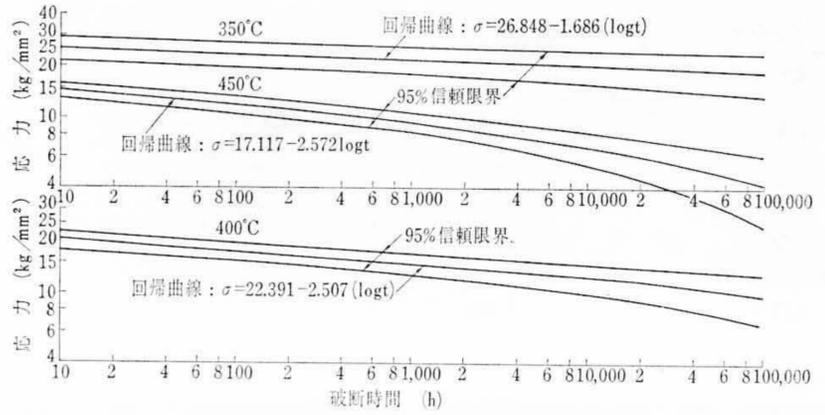


図11 FCMB28の応力-破断時間線図(1次回帰)-(5)式一

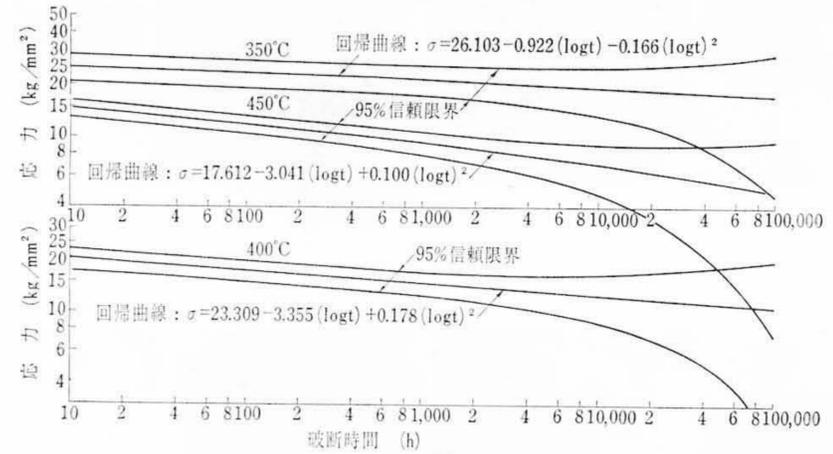
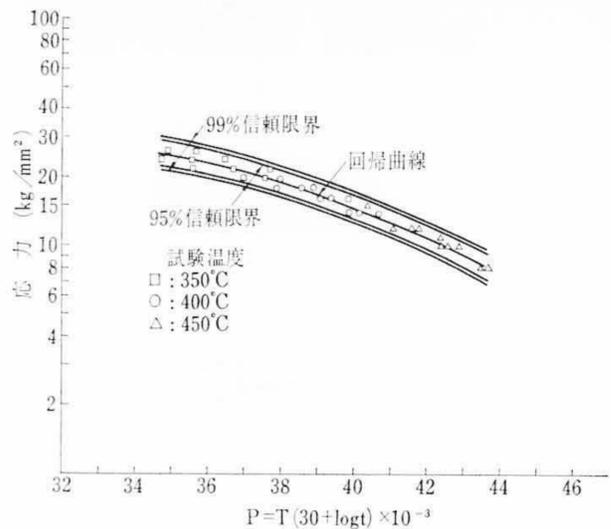


図12 FCMB28の応力-破断時間線図(2次回帰)-(6)式一



パラメータ $P = T(30 + \log t) \times 10^{-3}$

時間	300°C	350°C	400°C	450°C	500°C
100	33.02	35.90	38.78	41.66	44.54
1,000	34.06	37.03	40.00	42.97	45.94
10,000	35.09	38.15	41.21	44.27	47.33
100,000	36.12	39.27	42.42	45.57	48.72

図13 FCMB28のMaster破断曲線(2次回帰)-(7)式一

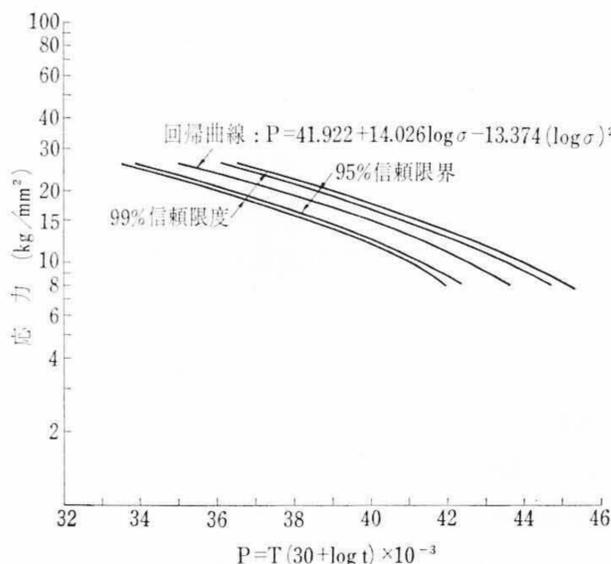
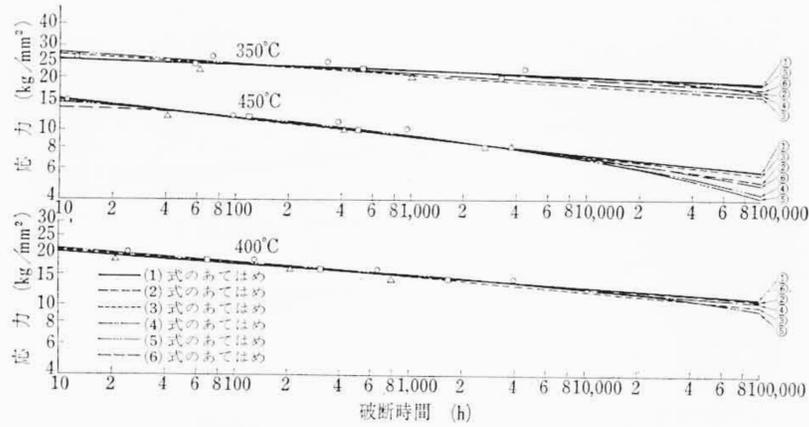


図14 FCMB28のMaster破断曲線(2次回帰)-(8)式一



(各種方程式のあてはめによる回帰曲線)

図15 FCMB28の応力-破断時間線図

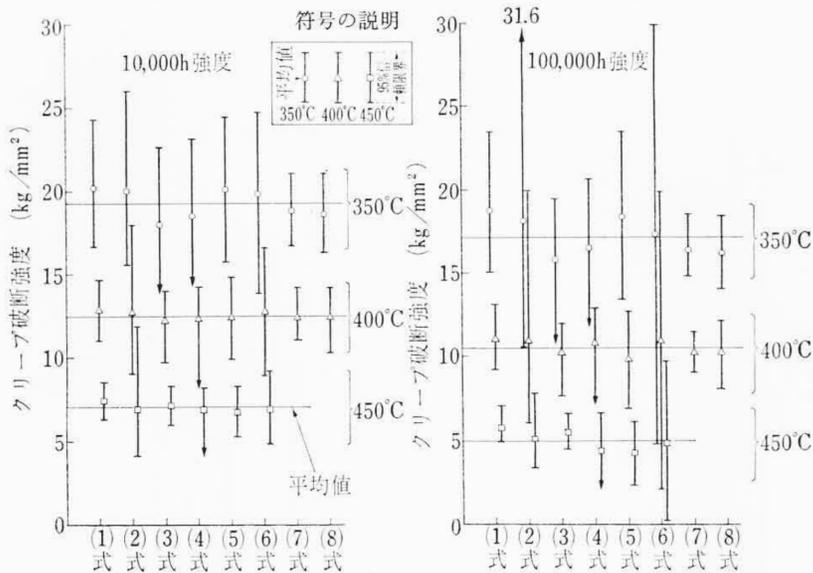


図16 FCMB28についての各種方程式あてはめによるクリープ破断強度の平均値および95%信頼限界

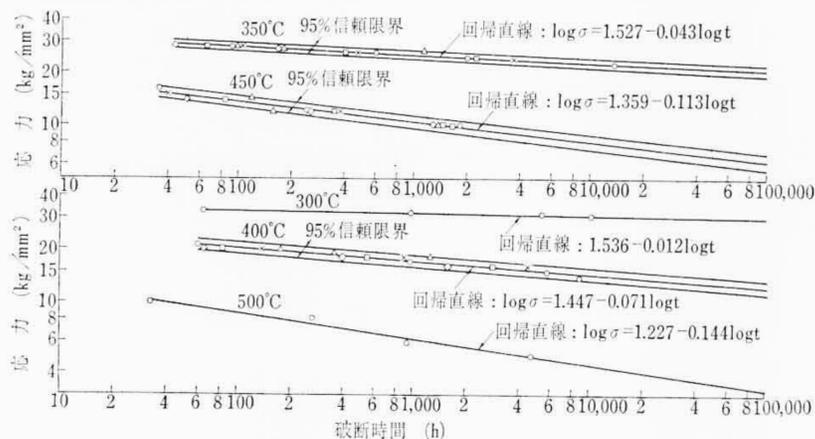


図17 FCMB35の応力-破断時間線図(1次回帰)-(1)式一

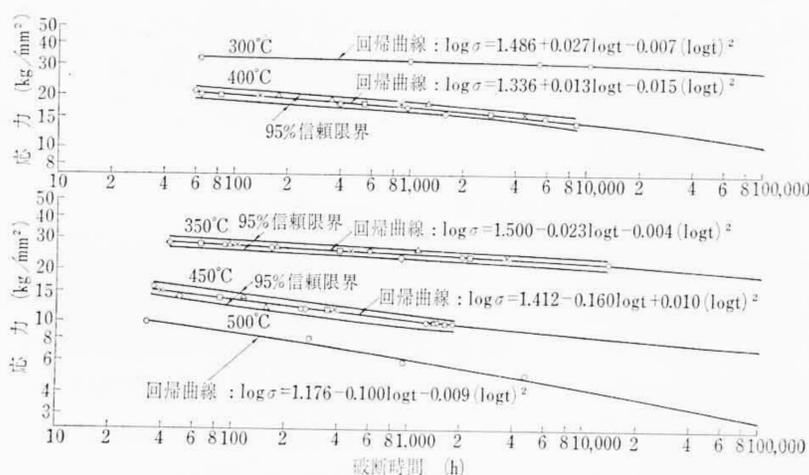


図18 FCMB35の応力-破断時間線図(2次回帰)-(2)式一

(3) (5)および(6)式

指定破断時間に対する破断応力は正規分布をすると仮定し、 σ を確率変数、 $\log t$ を指定変数と考えて次の1次式および2次式で回帰を行なった。

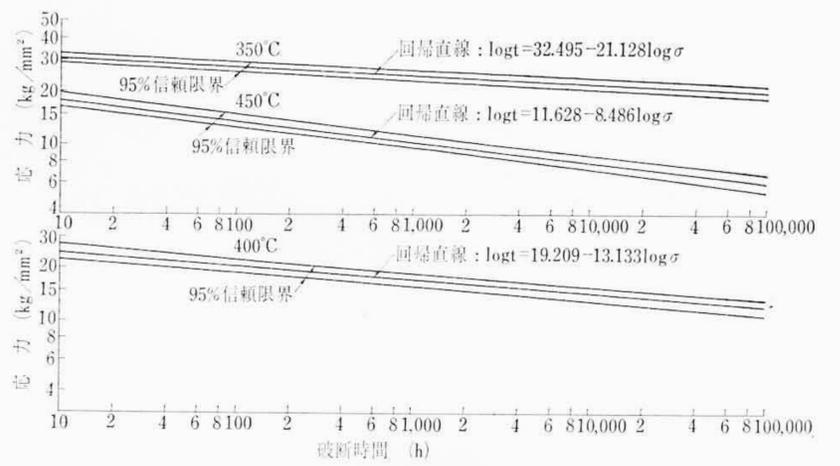


図19 FCMB35の応力-破断時間線図(1次回帰)-(3)式一

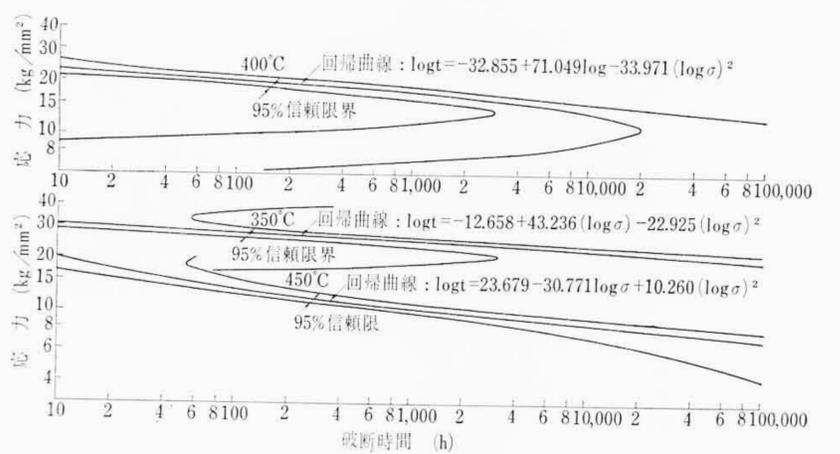


図20 FCMB35の応力-破断時間線図(2次回帰)-(4)式一

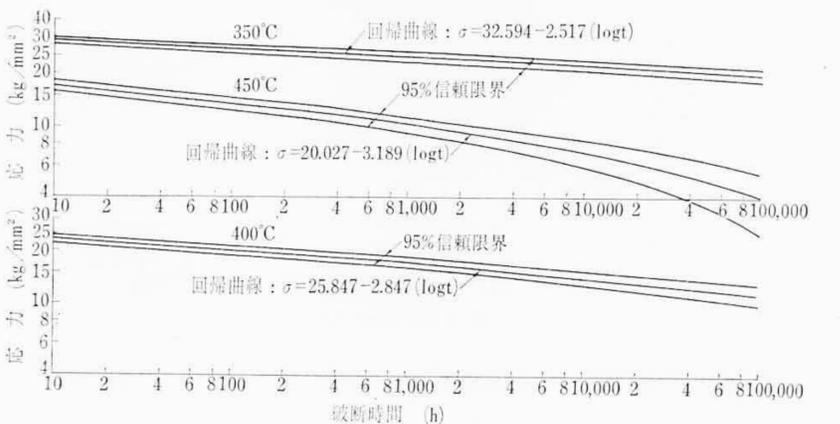


図21 FCMB35の応力-破断時間線図(1次回帰)-(5)式一

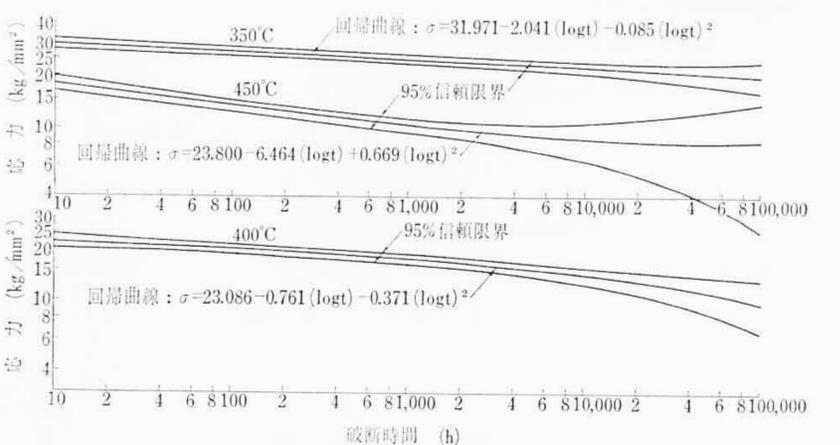


図22 FCMB35の応力-破断時間線図(2次回帰)-(6)式一

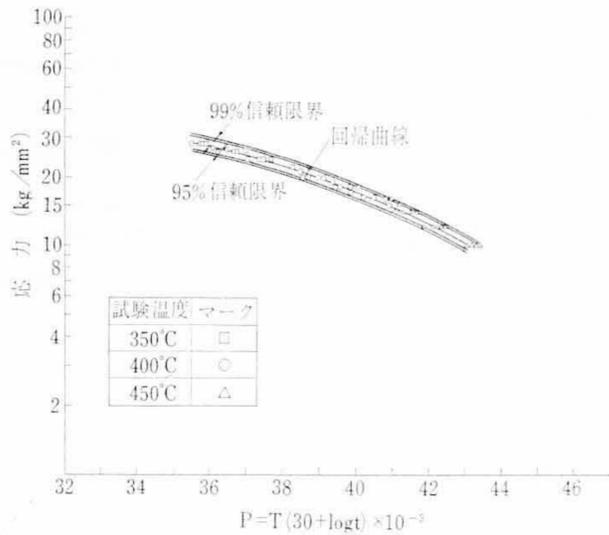
$$\sigma = \alpha_1 + \alpha_2(\log t) \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma = \alpha_1 + \alpha_2(\log t) + \alpha_3(\log t)^2 \dots\dots\dots (6)$$

以上(1)~(6)式は応力-破断時間線図のあてはめである。

(4) (7)および(8)式

(7)および(8)式はLarson & MillerのMaster破断曲線に2次曲線のあてはめを試みたものである。(7)式は指定パラメータのときに破断応力が対数正規分布をすると仮定し、 $\log \sigma$ を確率変数、パラメータPを指定変数と考えた。(8)式は(7)式と逆に一



パラメータ $P = T(30 + \log t) \times 10^{-3}$

時間	300°C	350°C	400°C	450°C	500°C
100	33.02	35.90	38.78	41.66	44.54
1,000	34.06	87.03	40.00	42.97	45.94
10,000	35.09	38.15	41.21	44.27	47.33
100,000	36.12	39.27	42.42	45.57	48.72

図 23 FCMB35 の Master 破断曲線 (2 次回帰) — (7) 式 —

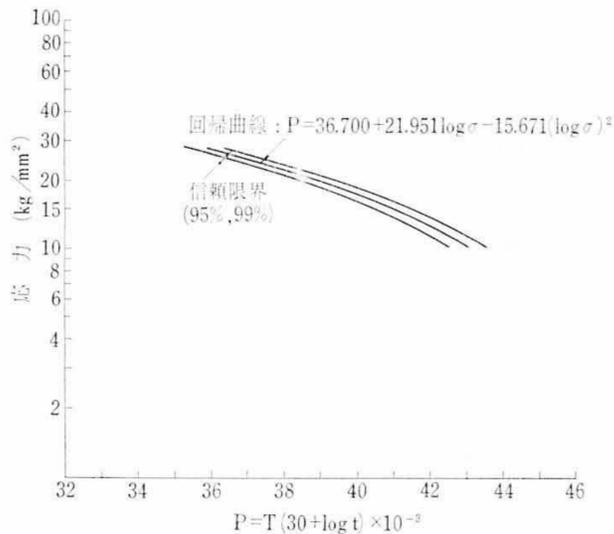


図 24 FCMB35 の Master 破断曲線 (2 次回帰) — (8) 式 —

定応力のもとで P は正規分布すると仮定し、 P を確率変数、 $\log \sigma$ を指定変数と考えた。

$$\log \sigma = \alpha_1 + \alpha_2 P + \alpha_3 P^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$P = \alpha_1 + \alpha_2 (\log \sigma) + \alpha_3 (\log \sigma)^2 \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $P = T(30 + \log t) \times 10^{-3}$: Larson & Miller のパラメータ

T : 試験温度 (ランキン温度)

2.4 組織

ピクリン酸アルコール溶液で腐食し、光学顕微鏡でクリーブ破断試験前後の組織を観察した。

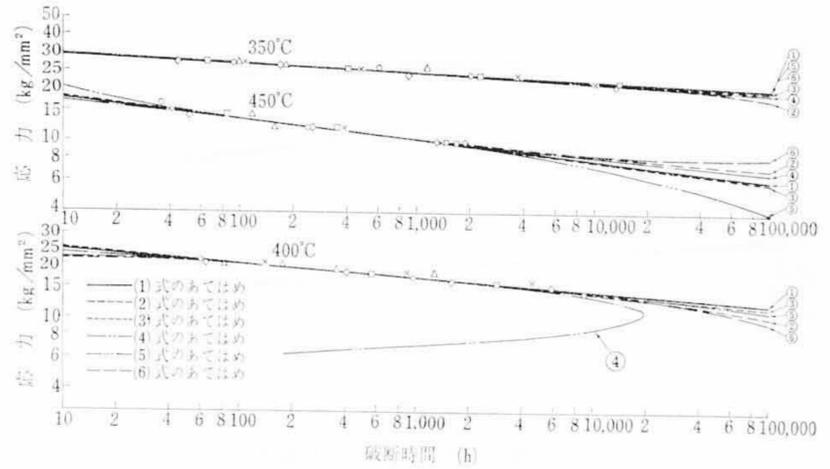
3. 実験結果

3.1 供試材の組織

図 3 は供試材の顕微鏡組織である。FCMB No. 3 の一部にはごく微量のパーライトが認められたが、そのほかの試料はすべて粒状黒鉛とフェライトからなっている。

3.2 引張試験結果

図 4~6 は高温における引張試験結果を示したものである。室温の引張強さは FCMB28 が 30.2~31.2 kg/mm²、FCMB32 が 34.8 kg/mm²、FCMB35 が 35.1~36.7 kg/mm² であり、伸びは FCMB35 が最も高い。図 5 は FCMB32 No.1 の高温引張特性であるが、比較のため FCMB28 および FCMB35 の平均値曲線を図示した。こ



(各種方程式のあてはめによる回帰曲線)

図 25 FCMB35 の応力-破断時間線図 — (9) 式 —

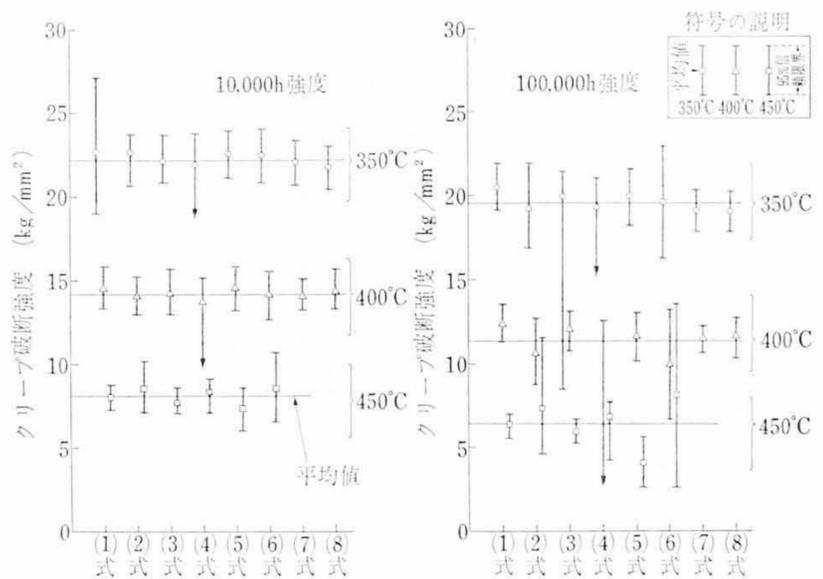


図 26 FCMB35 についての各種方程式あてはめによるクリーブ破断強度の平均値および信頼限界

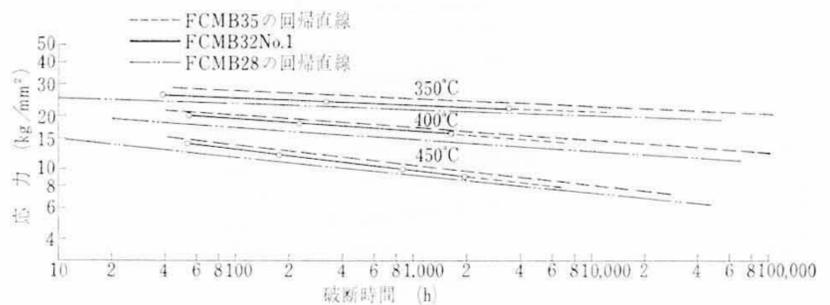


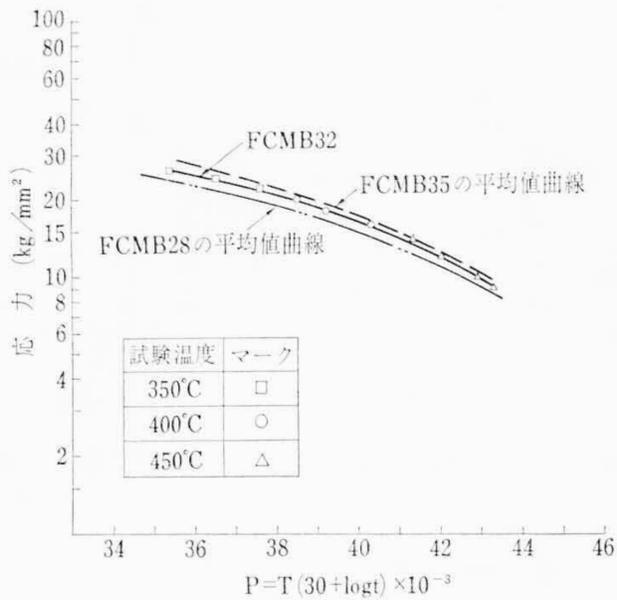
図 27 FCMB32 No.1 の応力-破断時間線図

の図で高温の引張特性を見ると引張強さは 100°C および 200°C では室温より若干低くなるが、300°C になると青熱脆性のため室温より高くなり、これ以上では温度の上昇とともに低下する。伸びおよび絞り は 350°C 付近までは温度の上昇とともに減少し、これ以上の温度では逆に増大する。

3.3 クリーブ破断試験結果

図 7~12 は FCMB28 の、図 17~22 は FCMB35 のそれぞれ (1)~(6) 式による応力-破断時間線図の回帰線および 95% 信頼限界を示している。図 15 および図 25 はこれら 6 個の式による回帰線を比較のため 1 枚の図にまとめたものである。図 13, 14 は FCMB28 の、図 23, 24 は FCMB35 の (7) および (8) 式による Master 破断曲線の回帰曲線および 95%, 99% 信頼限界を示す。図 16 および図 26 は以上 8 個の方法により求めた 10,000 時間および 100,000 時間の平均クリーブ破断強度および 95% 信頼限界を示している。

応力-破断時間線図の回帰により求めた平均クリーブ破断強度は図 15 および図 25 に見るように、実測値が存在する範囲内においては (1)~(6) 式のいずれによって求めてもほぼ同じ値を示すが、長時間側の外そう値は用いる式によってかなり差がでてくる。2 次回



パラメータ $P = T(30 + \log t) \times 10^{-3}$

時間	300°C	350°C	400°C	450°C	500°C
100	33.02	35.90	38.78	41.66	44.54
1,000	34.06	37.03	40.00	42.97	45.94
10,000	35.09	38.15	41.21	44.27	47.33
100,000	36.12	39.27	42.42	45.57	48.72

図28 FCMB28, FCMB32 および FCMB35 の Master 破断曲線

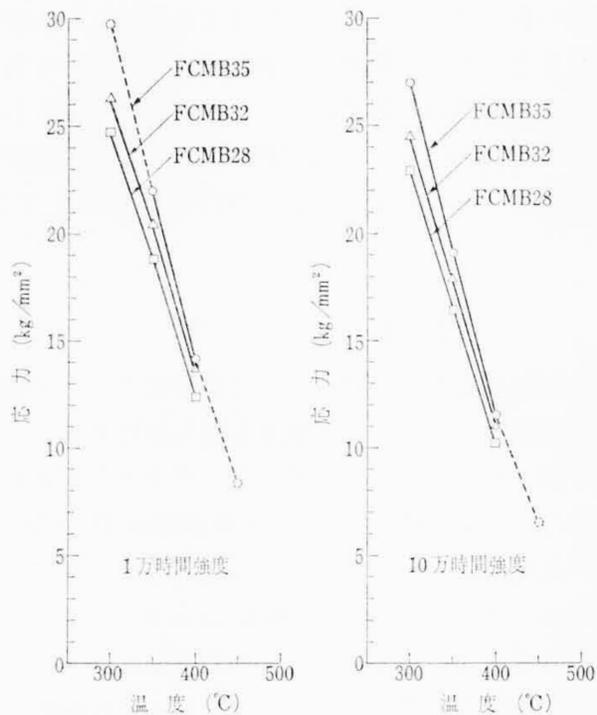


図29 黒心可鍛鋳鉄の長時間平均クリーブ破断強度

帰の場合は放物線で近似されるので、場合によっては FCMB35, 400°C の(4)式による回帰曲線のように破断時間が応力 11 kg/mm² のところで最大になるという不合理がでてくる(図25)。

図27はFCMB32の応力-破断時間線図を、図28はこれらの Master 破断曲線を示したものである。この図には比較のため FCMB28 と FCMB35 の回帰曲線を図示した。FCMB32 に対しては試験データが1溶解材のみなので、回帰分析を行なわなかった。図29は Master 破断曲線から求めたこれら3種の鋳鉄の10,000 および 100,000 時間平均クリーブ破断強度と温度の関係を示したものである。

図30, 31はクリーブ曲線より求めた最小クリーブ速度と応力の関係である。

図32はクリーブ破断試験後の顕微鏡組織である。破断部付近のクラック状況から見ると、クリーブ破断はまず黒鉛の部分に生じ、黒鉛から黒鉛へとフェライト粒界を伝わって起こるようである。破断後の組織は試験中に生じたフェライト地のすべり線のほかは特に変化は認められない。

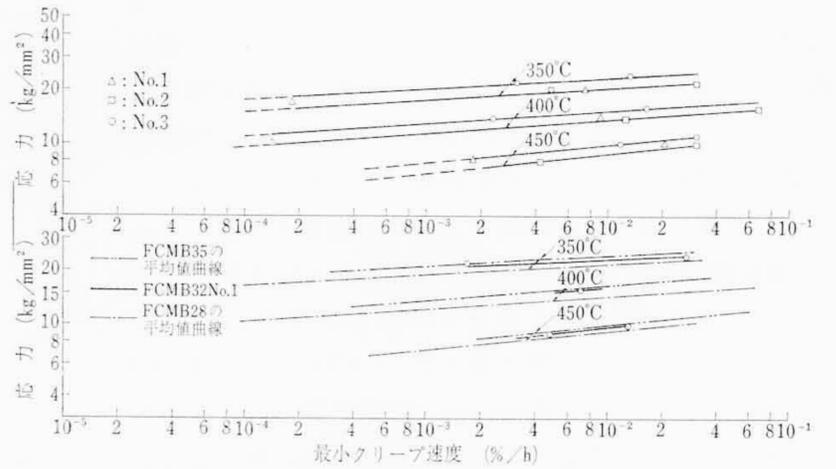


図30 FCMB28 および FCMB32 の応力-最小クリーブ速度線図

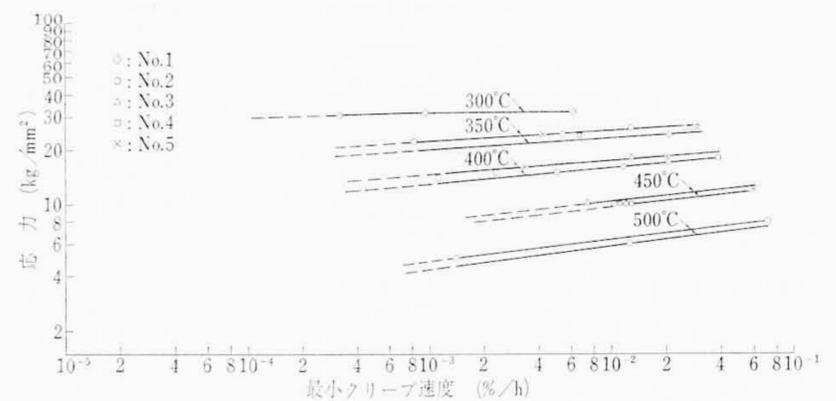


図31 FCMB35 の応力-最小クリーブ速度線図

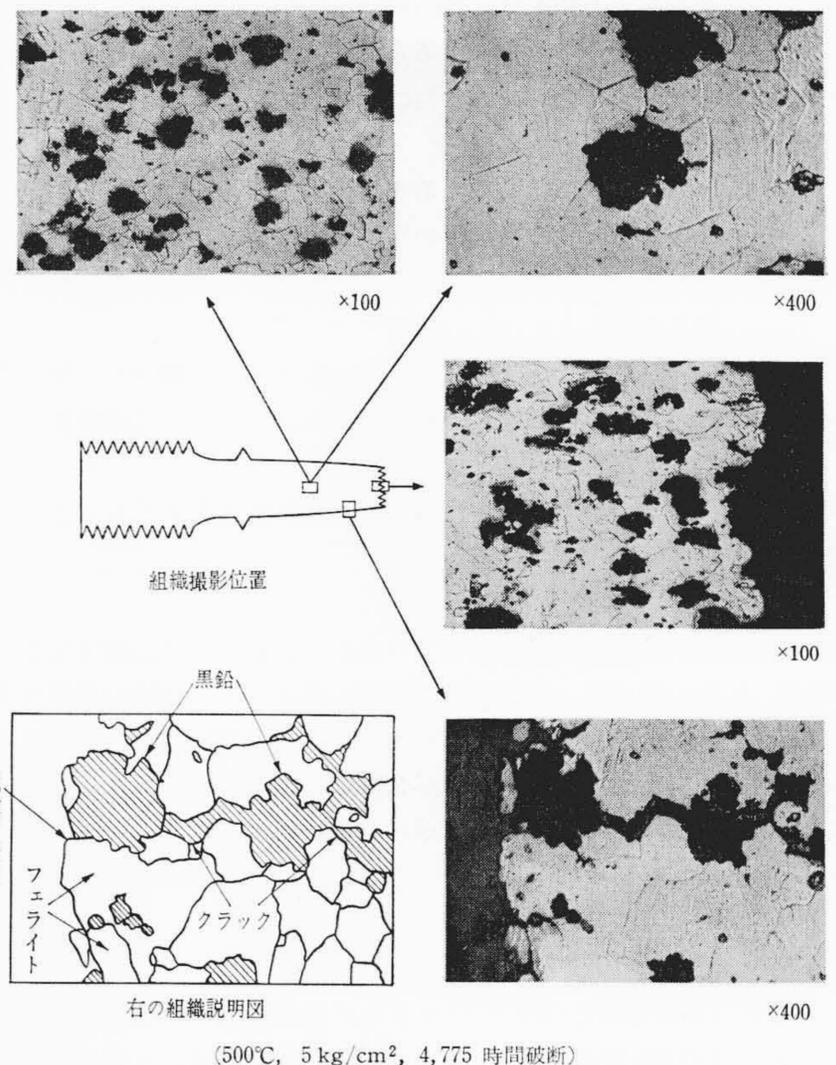


図32 FCMB35 No.2 のクリーブ破断試験片の組織

4. 検 討

4.1 100,000 時間強度およびばらつきの推定に関する検討
本鋳鉄のクリーブ破断強度のばらつきは試験前の予想より非常に小さい。特に FCMB35 のばらつきは小さく、試験時間範囲内では 95% 信頼限界で平均強度のたかだか ±1.5 kg/mm² 程度である。

FCMB28とFCMB35については(1)~(8)式による回帰分析を行なったが、「A式によれば高めの外そう値が得られる」とか「B式によれば低めの外そう値が得られる」とかいうことはデータのばらつき状態により回帰線の傾向が変わるので、一般的傾向として明言できない。しかし本報の黒心可鍛鉄のように組織変化がなく、応力-破断時間線図が直線的なものに対しては2次回帰によるより1次回帰による外そうのほうがまざっている。2次回帰は一般に放物線となり(4)式あるいは(8)式の場合、外そう線はある応力で破断時間の最大値があらわれ、それ以下の応力では破断時間が逆に短くなるという不合理がある。(2)式あるいは(7)式では座標が入れ変わっているのでこのような不合理は形に出てこない。長時間側の信頼限界は一般に平均値そのものの不確定のために広がり、特に100,000時間で著しく広がり実用上のばらつきを推定することはできない。冶金学的にみて強度のばらつきが長時間側で極端に広がるとは考えられないので、応力-破断時間線図の2次回帰で100,000時間強度の信頼限界を求めるのは不適當と思われる。

Master 破断曲線の回帰分析により求めた平均クリーブ破断強度は(7)式でも(8)式でも同一値が得られる。信頼限界においては高温長時間側で(7)式によるよりも(8)式によるほうが若干幅広く推定される。

どの方法によって求めた推定値が真の100,000時間強度およびそのばらつきを与えるのかは、100,000時間の実測値がなければ明言できないが、下記の点から考えると本鉄に対してはMaster 破断曲線の2次回帰((7)または(8)式)が比較的妥当性のある推定値を与えるようである。

- (1) (7)または(8)式による平均値は図16および図26に示される8個の式の推定値の平均にほぼ等しいか、またはわずかに低目である。したがって100,000時間強度が高目に推定されることがないので実用的に安全である。
- (2) (7),(8)式では種々の温度でのデータを統一して推定を行なうため、一温度のデータのみから得られる推定値より信頼性が大きいと考えられる。
- (3) (7)および(8)式の信頼限界は極端に大きくなることはない。

4.2 許容応力に関する検討

従来ボイラ付属設備材料としての黒心可鍛鉄の使用制限温度は230°Cとされていた。しかし製造技術の発達により鉄の品質は著しく向上し、JISが改訂されたのに引き続いて昭和40年の発電用ボイラ火力技術基準では使用制限が350°Cまで引き上げられ、許容応力も1.6倍に引き上げられた。ボイラ用材料の許容応力を決める場合、基準値として次に掲げる値のうち最小のものが用いられる。

- (a) 引張強さの0.25倍
- (b) 耐力の0.625倍
- (c) 1,000時間に0.01%のクリーブ速度を生ずる応力の平均値
- (d) 100,000時間で破断する応力の平均値の0.6倍または最小値の0.8倍

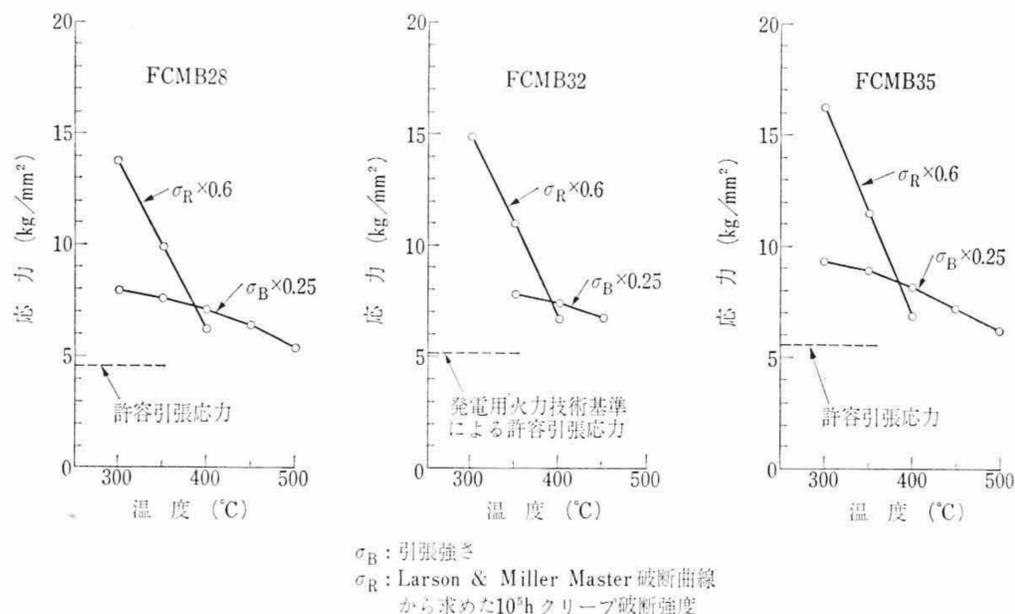


図33 黒心可鍛鉄の許容応力と高温強度

よってこれらの値を比較してみよう。図33は(a)および(d)の値と温度の関係を示したもので、高温側では(d)の値より(a)のほうが高いが、約380°Cでこれが同一値となり、これ以下の温度では(d)の値のほうが高い。(b)の値は引張試験結果から推察して、(a)の値をかなり上回るとみられる。また(c)の値は図30および図31から(d)の値と同等あるいはそれ以上と推定される。したがって許容応力の規定されている350°Cまでは前述した4項目のうち(a)の値が最小となり、本鉄の許容応力は引張強さで決まる。すなわち、一般的には黒心可鍛鉄のクリーブ域は380°C以上で、また450°Cまでの温度においては100,000時間破断強度の60%にCasting Quality Factorを乗じた値を許容応力と考えてよいであろう。

5. 結 言

以上、黒心可鍛鉄9溶解材について長時間クリーブ破断試験および高温引張試験を行ない、高温強度を明らかにするとともに、そのばらつきを調べた。8とおりの式を用いてクリーブ破断データの回帰分析を行ない、本鉄ではLarson & Miller法のMaster曲線の2次回帰が比較的妥当な外そう値を与えるものと考えられる。また黒心可鍛鉄のクリーブ域は約380°C以上で、これ以下の温度では引張強さが許容応力を支配することが明らかにされた。また380°C以上で使用する場合の許容応力についても一応の根拠をうることができた。

本研究を行なうに当たり、試料の作製に尽力された日立金属株式会社桑名工場の関係のかたがた、ならびに実験の一部を分担された日立製作所日立研究所池田伸三氏に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) L. C. Marshall, G. F. Sommer, D. A. Pearson: Metal Progress, 77, 102 (1960)
- (2) Materials in Design Engineering, 51, 105 (1960)
- (3) ASTM: Properties of Cast Iron at Elevated Temperatures STP No. 248
- (4) 佐々木: 日本材料試験協会, 第11期総会講演会前刷, 79 (1962)