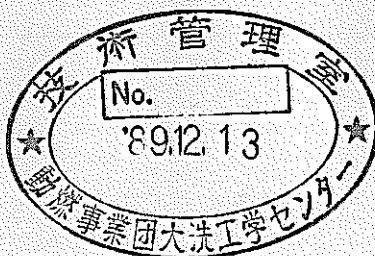


FBR炉心材料用酸化物分散強化型フェライト鋼の材料特性

第1報 INCOLOY MA957 及びMA956 の高温強度特性



1989年8月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N 9410 89-137

この資料は 図書室保存資料です
閲覧には技術資料閲覧票が必要です

動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

FBR炉心材料用酸化物分散強化型フェライト鋼の材料特性

第1報 INCOLOY MA957 及びMA956 の高温強度特性

吉田英一* 飯塚昇司** 加藤章一*
関成一* 加納茂機*

要 旨

酸化物分散強化型フェライト鋼は、高温強度特性及び耐照射スエリング特性に優れていることから、高速炉用の長寿命炉心材料として注目されている。本研究では、INCO社製のINCOLOY MA957 及びMA956の大気中におけるクリープ特性及び低サイクル疲労特性並びに物理的性質に関する試験を実施し、基本的な材料特性を評価した。

クリープ試験は600°Cから800°Cの範囲で最長約1万時間まで、低サイクル疲労試験は温度：550°Cから750°C、ひずみ速度：0.1%/sec及びひずみ範囲：0.5～1.2%の範囲で実施した。さらに、物理的試験を実施し、密度、比熱、熱伝導率、熱膨張係数及びヤング率等の物性値を求めた。

これらの結果、次のような知見が得られた。

MA957のクリープ破断強度は、長時間側で現行の改良SUS316(20%冷間加工材)を上回る優れた強度を示した。ただし、強度に対する異方性がみられ、圧延方向に直角な方向でのクリープ破断強度の顕著な低下が認められた。MA956のクリープ破断強度はMA957よりも著しく低い値を示し、従来の9～12Cr並の強度であった。これは、主に強化組成や分散粒子の大きさ等の相違によるものと考えられる。MA956の低温域を除くと、クリープ破断延性は数%程度の小さな値であった。

MA957の低サイクル疲労寿命は、ひずみ範囲が1%以下の領域ではSUS316の寿命よりも僅かに下回った。また、高ひずみ側では繰り返し硬化現象を示した。

MA957の物理的性質は、マルテンサイト系のSUS410と類似していた。

本研究の成果は、今後の酸化物分散強化型フェライト鋼の開発に資される。

* 大洗工学センター、機器構造開発部、材料開発室

** 現、東海事業所、再処理工場、化学処理第1課

MATERIAL PROPERTIES OF OXIDE DISPERSION STRENGTHENED
FERRITIC STEELS FOR CORE MATERIALS OF FBR

Mechanical Properties of INCOLOY MA957 and MA956 at
Elevated Temperature

Eiichi YOSHIDA*, Shoji IITSUKA**, Shoichi KATO*
Seiichi SEKI*, Shigeki KANO*

Abstract

Oxide dispersion strengthened ferritic steel (ODS) is expected to be applied for the long life core materials in large scale FBR, because of good swelling resistance and high creep strength. In this study, creep-rupture, low-cycle fatigue and physical properties tests were performed on MA957 and MA956 in air. Furthermore, various basic materials properties were evaluated.

Creep-rupture tests were conducted up to 10,000 hours at 600-800°C. Low-cycle fatigue tests were conducted at 550-750°C under strain control mode with full-reversed triangular waves, at the strain rate of 0.1 %/sec and the total strain range of 0.5-1.2 %.

Creep-rupture strength of MA957 was higher than that of 20% cold-worked modified SUS316 SS at long time. But the specimen picked up from transverse angle against drawing direction showed the significant decrease in creep-rupture strength. MA956 had lower creep-rupture strength than MA957. It was same as those of 9Cr-12Cr ferritic steels. Creep-rupture elongation was few percents except for that of MA956 at low-temperature range ($\leq 650^{\circ}\text{C}$).

Fatigue life of MA957 was a little lower than that of SUS316 SS at strain range below 1.0%. Under high strain condition, cyclic hardening was observed.

Physical properties of MA957 were similar to those of martensite SUS410.

These results will be reflected to development of oxide dispersion strengthened ferritic steel.

*Materials Development Section, Components and Systems
Division, OEC/PNC

**1st Chemical Processing Section, Processing Division, Tokai
Reprocessing Plant, PNC

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験方法	2
2.1 供試材	2
2.2 材料強度試験方法	2
2.3 材料試験後の解析方法	3
3. 試験結果	4
3.1 クリープ及びクリープ破断特性	4
3.2 低サイクル疲労特性	5
3.3 物理的性質	5
3.4 組織変化	6
4. 検 討	8
4.1 Larson-Millerパラメータ法によるクリープ破断特性の整理	8
4.2 高温強度特性の検討	8
5. 結 言	10
参考文献	11

表 リ ス ト

Table 1. MA 957, MA 956 の化学成分	1 3
Table 2. 室温及び高温引張特性	1 3
Table 3. クリープ破断試験条件	1 4
Table 4. 低サイクル疲労試験条件	1 4
Table 5. 酸化物分散強化型フェライト鋼MA 957 のクリープ試験結果(L 方向)	1 5
Table 6. 酸化物分散強化型フェライト鋼MA 957 のクリープ試験結果(T 方向)	1 6
Table 7. 酸化物分散強化型フェライト鋼MA 956 のクリープ試験結果(L 方向)	1 7
Table 8. MA 957 の低サイクル疲労試験結果	1 8
Table 9. MA 957 の物理的性質	1 9

図 リ ス ト

Fig. 1 高速炉用燃料被覆管材料の開発目標	2 1
Fig. 2 MA 957 の引張強さ	2 2
Fig. 3 酸化物分散強化型フェライト鋼の製造工程	2 3
Fig. 4 クリープ試験片形状(mm)	2 4
Fig. 5 低サイクル疲労試験片形状(mm)	2 4
Fig. 6 MA 957 の大気中クリープ破断特性(L 方向)	2 5
Fig. 7 MA 956 の大気中クリープ破断特性(L 方向)	2 6
Fig. 8 MA 957 と MA 956 とのクリープ破断特性の比較(L 方向)	2 7
Fig. 9 MA 957 の大気中クリープ破断特性(T 方向)	2 8
Fig. 10 クリープ破断特性に及ぼす試験片採取方向の影響	2 9
Fig. 11 MA 957 の 600°C におけるクリープ曲線	3 0
Fig. 12 MA 957 の 650°C におけるクリープ曲線	3 0
Fig. 13 MA 957 の 700°C におけるクリープ曲線	3 1
Fig. 14 MA 957 の 750°C におけるクリープ曲線	3 1
Fig. 15 MA 957 の 800°C におけるクリープ曲線	3 2
Fig. 16 MA 956 の 600°C におけるクリープ曲線	3 3
Fig. 17 MA 956 の 650°C におけるクリープ曲線	3 3
Fig. 18 MA 956 の 700°C におけるクリープ曲線	3 4
Fig. 19 MA 956 の 800°C におけるクリープ曲線	3 4

Fig.20 MA 957 の定常クリープ速度	35
Fig.21 MA 956 の定常クリープ速度(L 方向)	36
Fig.22 550°CにおけるMA 957 の繰返しに伴う応力変化	37
Fig.23 650°CにおけるMA 957 の繰返しに伴う応力変化	38
Fig.24 750°CにおけるMA 957 の繰返しに伴う応力変化	39
Fig.25 酸化物分散強化型フェライト鋼MA 957 の大気中低サイクル疲労特性	40
Fig.26 MA 957 とSUS316, SUS410 フェライト鋼との比熱の比較	41
Fig.27 MA 957 とSUS316, SUS410 フェライト鋼との熱伝導度の比較	42
Fig.28 MA957, MA956 とSUS316, SUS410 フェライト鋼との熱膨張係数の比較	43
Fig.29 MA957, MA956 とSUS316, SUS410 フェライト鋼とのヤング率の比較	44
Fig.30 Larson-Miller パラメータ法によるクリープ破断強さの整理(MA 957 L 方向)	45
Fig.31 Larson-Miller パラメータ法によるクリープ破断強さの整理(MA 957 T 方向)	45
Fig.32 Larson-Miller パラメータ法によるクリープ破断強さの整理(MA 956 L 方向)	46
Fig.33 クリープ破断時間の予測値と実測値との関係(MA 957 L 方向)	47
Fig.34 クリープ破断時間の予測値と実測値との関係(MA 957 T 方向)	47
Fig.35 クリープ破断時間の予測値と実測値との関係(MA 956 L 方向)	48
Fig.36 MA 957, MA 956 と改良SUS316, 炭化物析出強化型 フェライト鋼の 650°C クリープ破断強度の比較	49
Fig.37 長時間クリープ破断応力の比較(LMP からの外挿応力)	50
Fig.38 550°Cにおける低サイクル疲労寿命の比較	51
Fig.39 650°Cにおける低サイクル疲労寿命の比較	52
Fig.40 750°Cにおける低サイクル疲労寿命の比較	53

写 真 リ ス ト

Photo.1 650°C, 2445 h クリープ破断材の破面観察(MA 957)	54
Photo.2 700°C, 4268 h クリープ破断材の破面観察(MA 957)	55
Photo.3 800°C, 87 h クリープ破断材の破面観察(MA 957)	56
Photo.4 酸化物分散強化型フェライト鋼MA 957 の 650°C における クリープ破断近傍部の組織(圧延方向面)	57
Photo.5 酸化物分散強化型フェライト鋼MA 957 の 700°C における クリープ破断近傍部の組織(圧延方向面)	58

Photo.6	酸化物分散強化型フェライト鋼MA957の800°Cにおける クリープ破断近傍部の組織	59
Photo.7	MA957のクリープ破断試験後の抽出レプリカ観察(700°C, t _R =4268.7h)…	60
Photo.8	550°C低サイクル疲労試験片の破面観察(MA957)…	61
Photo.9	650°C低サイクル疲労試験片の破面観察(MA957)…	62
Photo.10	750°C低サイクル疲労試験片の破面観察(MA957)…	63
Photo.11	550°C低サイクル疲労試験片の断面ミクロ組織	64
Photo.12	650°C低サイクル疲労試験片の断面ミクロ組織	65
Photo.13	750°C低サイクル疲労試験片の断面ミクロ組織	66

1. 緒 言

燃料材料の長寿命化は、燃料サイクル費の低減及びプラントの高稼働化等を可能とするため、高速炉の経済性向上に大きく寄与する。動燃事業団では高速炉用長寿命炉心材料開発の一環として、高強度フェライト系耐熱鋼の研究開発を行っている。このうち、酸化物分散強化型フェライト鋼(Oxide-Dispersion Strengthened Ferritic Steel, ODS)は、照射スエリング特性に優れ、かつ従来のフェライト系耐熱鋼の弱点である高温強度にも優れていることなど、両者を兼ね備えた材料として注目され、実用化のための研究開発が展開されている^{1), 2)}。高速炉用炉心材料の開発目標の概念図をFig. 1に示す。

動燃事業団においては、酸化物分散強化型フェライト鋼の研究開発の第一ステップとして、INCO社が開発した INCOLOY MA957 及びMA956 の市販品素材を購入し、材料強度特性とその強化機構、物理的性質、FBR環境効果特性及び加工・溶接性等に関する一連の材料特性評価試験を実施してきた^{3)~7)}。

本研究では、上記の評価試験の一環として INCOLOY MA957 及びMA956 の基本的な機械的性質と物理的性質を把握することを目的に、大気中におけるクリープ試験、低サイクル疲労試験及び物性値測定試験を実施した。本報告は、これらの基本的な材料特性試験の結果についてまとめたものである。

2. 試験方法

2.1 供試材

供試材には、酸化物分散強化型フェライト鋼 INCOLOY MA957 及び MA956（以下「MA957」、「MA956」と称する）を用いた。これらの素材はインコ社・日本代理店（大同インコアロイ社）から購入した。供試材の化学成分を Table 1 に、室温及び高温引張強度特性を Table 1 及び Fig. 2 にそれぞれ示す。

酸化物分散強化型フェライト鋼はメカニカル・アロイング法によって製造され、分散強化相にはイットリウム酸化物 Y_2O_3 (MA957 : 0.27 wt%, MA956 : 0.47 wt%) を用いている。製造工程の概要を Fig. 3 に示すが、詳細については別報⁸⁾を参考にされたい。

本試験に供したクリープ試験片の形状を Fig. 4 に示す。試験片は、原則として標点間部が圧延方向と平行（以下「L 方向」という）になるように、MA957 及び MA956 板材から採取した。標点間距離は 40 mm, 平行部幅は 8 mm 及び板厚は MA957 が 1 mm, MA956 が 2 mm である。ただし、MA957 については材料特性の異方性を調べるために、圧延方向に対して直角方向（以下「T 方向」という）からも同一形状の試験片を一部採取した。

疲労試験片の形状を Fig. 5 に示す。疲労試験片は MA957 熱押素管 (63.5 mm OD × 9.5 mm t) から標点間部が素管軸方向と平行になるように採取した。平行部長さは 20 mm 及び径は 5 mm の丸棒型試験片である。MA956 については素材量の制約上、疲労試験を実施しなかった。

2.2 材料強度試験方法

(1) クリープ試験

試験は JIS Z 2771 「金属材料の引張クリープ試験方法」及び JIS Z 2772 「金属材料のクリープ破断試験方法」に従って実施した。試験には、定荷重引張クリープ試験機を用いた。試験機の荷重容量は最大 5 トン、荷重精度は 0.5 %、レバー比は 1 : 10 である。

クリープ試験条件を Table 3 に示す。試験は、MA957 及び MA956 を対象に、試験温度 600 から 800 °C の範囲で最長約 10,000 時間まで実施し、破断強度、破断伸び、及び定常クリープ速度等を求めた。

(2) 低サイクル疲労試験

試験は FBR 金属材料試験実施要領書に従って実施した。試験には、荷重負荷容量 ± 5 トンの電気油圧サーボ式単軸引張圧縮疲労試験機を用いた。試験片平行部の変位量は、押し当て型ひずみ検出器で測定した。

低サイクル疲労試験条件を Table 4 に示す。試験は平均ひずみ零の定ひずみにて、三角波で実施した。試験温度は 550 °C から 750 °C の 3 温度、ひずみ速度 ($\dot{\epsilon}$) は 0.1 % / sec 及び全ひずみ範囲 ($\Delta \epsilon T$) は 0.5 ~ 1.2 % である。破損回数 (N_f) は、引張側荷重がピーク荷重に対して 25 %

の減少を生じた時を破損と定め、その時までの回数とした。

(3) 物性値測定試験

MA957についての物性値測定試験を実施した。測定項目と試験方法は以下の通りである。

- ① 密度：JIS Z 8807「固体比重測定法」
- ② 比熱：断熱型連続法
- ③ 热伝導率：レーザーフラッシュ法
- ④ 热膨張係数：押棒式測定法
- ⑤ ヤング率：振動法
- ⑥ ポアソン比：ヤング率と剛性率との関係より算出

2.3 材料試験後の解析方法

クリープ及び低サイクル疲労試験を実施した試験片を用いて、以下に示す冶金的な材料解析を行った。

(1) 金属組織観察

金属組織観察は光学顕微鏡を用いて、クリープ及び疲労破損部近傍と均一部の組織変化に着目して実施した。撮影倍率は100倍及び400倍である。

また、抽出レプリカ法により材料を作製し、透過型電子顕微鏡及びエネルギー分散型X線分析装置を用いて、材料試験後の析出物の形態、分布及び成分等の分析・観察を実施した。撮影倍率は最大75,000倍である。

(2) 破面観察

走査型電子顕微鏡を用い、代表的なクリープ及び疲労試験片について、破損部の破面形態を観察した。撮影倍率は約20倍から3,500倍である。

3. 試験結果

3.1 クリープ及びクリープ破断特性

高速炉用燃料被覆管は、核分裂生成ガス (Fission Product Gas, FPガス)による内圧を受けながら使用されるため、照射スエーリング特性と並んで高温クリープ強度が燃料の寿命を決める重要な因子のひとつになっている⁹⁾。このため、本試験では酸化物分散強化型フェライト鋼のクリープ特性を把握するため、燃料被覆管が使用される温度領域を中心に試験を実施した。本試験で得られたクリープ試験データをまとめてTable 5からTable 7に示す。

(1) クリープ破断強度

600～800°CにおけるMA957のクリープ破断特性 (L方向)をFig. 6に、MA956のクリープ破断特性 (L方向)をFig. 7にそれぞれ示す。また、両者のクリープ破断特性の比較をFig. 8に示す。MA957及びMA956の両者とも、クリープ破断強度は分散強化型フェライト鋼に特有な時間依存性の小さいクリープ破断曲線を示し、長時間側になるとほど優位性が顕著に認められた。また、MA957とMA956の両者のクリープ破断強度を比較すると、クリープ破断強度は、いずれの温度においてもMA957がMA956よりも高い強度を示しており、著しい強度の差が認められた。この差は、長時間側ほど大きくなる傾向を示した。

次に、MA957のT方向におけるクリープ破断強度を、650°C及び700°CについてFig. 9に示す。また、L方向とT方向との試験片採取方向によるクリープ破断強度の比較をFig. 10に示す。クリープ破断強度は、L方向のそれらに比較して著しい低下がみられた。その低下は、同一温度・時間で比較すると、クリープ破断時間が3～4桁以上短くなっている。

(2) クリープ破断伸び

クリープ破断伸びを上記で示したクリープ破断強度と同様にFig. 6からFig. 10に示す。L方向のクリープ破断伸びはMA957の場合、最大でも5%程度であり、通常のステンレス鋼などの金属材料に比較すると変形し難い特性となっている。この結果は、いずれの温度においても同様であり、試験温度の依存性はみられていない。MA956のクリープ破断伸びは600°C及び650°Cでは数十%の高い伸びを示したが、700及び800°Cの高温側になると破断伸びは減少した。ただし、650°Cの場合、長時間破断になるとほどクリープ破断伸びが減少する傾向を示し、1,000時間では700及び800°Cにおける破断伸びと同等になった。

MA957に関する試験片採取方向についてみると、T方向のクリープ破断伸びは100時間以下の短時間側ではL方向のそれよりも高い値を示したが、それ以上の長時間では採取方向の差異が減少する傾向を示した。

(3) クリープ曲線

MA957及びMA956のクリープ曲線をFig. 11からFig. 19に示す。MA957のクリープひずみ挙動は、600～800°Cの温度とも第一期及び第二期クリープの過程から直接破断に

至っており、第三期クリープ領域は認められていない。MA956のクリープひずみ挙動は、600°Cの比較的低温側では第一期から第三期クリープまでの多くの金属材料にみられる一般的なクリープひずみ挙動を示したが、これよりも高温側ではMA957と同様な結果であった。

上記に示したクリープ曲線から求めた定常クリープ速度と応力との関係を Fig. 20 及び Fig. 21 に示す。

3.2 低サイクル疲労特性

炉心材料は、主に原子炉プラントの起動・停止時に伴う温度変化等により繰り返しひずみを受けるため、基本材料特性のひとつとして疲労特性を把握しておく必要がある。このため、低サイクル疲労試験をMA957について550～750°Cの温度範囲で実施した。本試験で得られた疲労試験データを Table 8 に示す。

ひずみの繰り返しに伴う応力の変化を温度別に Fig. 22～Fig. 24 に示す。本試験の結果では高ひずみ側において繰り返しに伴う僅かな応力の増加、すなわち繰り返し硬化現象が認められた。繰り返し硬化現象の試験温度による有意な差は見られなかった。これまでに得られている 2 1/4 Cr-1Mo 及び Mod. 9Cr-1Mo 鋼等のフェライト系鋼では繰り返し軟化現象を示すことが多い¹⁰⁾が、MA957 ではこれらと異なった応力-ひずみ挙動を示している。

破断までの繰り返し回数と全ひずみ範囲との関係を Fig. 25 に示す。550°Cと650°Cでは疲労寿命の大きな差はみられないが、750°Cになると高ひずみ側で寿命の低下がみられた。

3.3 物理的性質

酸化物分散強化型フェライト鋼に関する物理的性質を測定することは、材料の基本的特性の把握のため並びに設計・評価時に必要となる基礎データとして重要である。本試験では、MA957について代表的あるいは設計上で必要となる物理的性質を調べた。以下にMA957の物理的性質を、これまでに得られているMA956¹¹⁾、SUS316^{12), 13)}及びSUS410¹⁴⁾と比較しながら記述する。

(1) 密 度

MA957の室温(20°C)における密度は7.67 g/cm³であった(Table 9-a)。この値は、MA956の密度(7.239)とSUS316の密度(8.06)の中間に位置する。また、マルテンサイト系のSUS410の密度(7.75)と近似した値である。

(2) 比 热

測定結果を Table 9-b 及び Fig. 26 に示す。MA957 の比熱は、250°C以下の温度領域ではSUS316とほぼ同じ挙動を示したが、この温度を越えると徐々にSUS316の比熱よりも大きくなる傾向を示した。また、700°C近傍の温度域では磁気変態¹⁵⁾と思われる比熱の急激な上昇がみられた。これは、SUS410の比熱挙動の特徴と似ている。

(3) 热伝導率

热伝導率の测定結果を Table 9-c 及び Fig. 27 に示す。MA957 の热伝導率は温度依存性が小さく、室温から 800°C の範囲で 0.26~0.27 W/cm・°C 程度であった。また、MA956 や SUS316 に比較すると、MA957 の热伝導率は高い値となっている。SUS410 とは热伝導率はほぼ類似していた。

(4) 热膨張係数

平均热膨張係数の测定結果を Table 9-d 及び Fig. 28 に示す。MA957 の热膨張係数は温度の上昇と共に緩やかに増大する傾向を示している。また、MA956 や SUS316 よりも MA957 の热膨張係数は小さく、上記と同様に SUS410 と比較的類似していた。

(5) ヤング率

MA957 のヤング率の測定結果を Table 9-e 及び Fig. 29 に示す。MA957 のヤング率は、室温：22,700 及び 500°C：19,200 kg/mm² であり、MA956 のヤング率よりも小さな値であった。

(6) ポアソン比

ポアソン比(ν)については、ヤング率(E)と剛性率(G)との関係から次式によって求めた¹⁶⁾。

$$\nu = E / 2G - 1$$

室温における MA957 のポアソン比は、上記式から求めると “0.31” となり、SUS316 並みの値であった。

3.4 組織変化

(1) クリープ破断試験後の組織変化

クリープ破断試験片の破面及びその近傍部について、走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察結果を Photo. 1~Photo. 3 に、光学顕微鏡による観察結果を Photo. 4~Photo. 6 にそれぞれ示す。観察は MA957 について 650°C, 700°C 及び 800°C における代表的な試験片を選択して行った。

クリープ破面の形態は、SEM 写真からもわかるように、いずれの温度においても二つに分類することができた。その一つは、試験片の端面に観察され、三角状に中央部に向けて進んでいるものである（写真上 A 部）。この面は厚いスケールに覆われており、破面の状況（形態）を明瞭に観察することができなかった。もう一つは、ディンプルパターンを呈している破面形態である。この部分は破面の概ね 9 割以上の面積を有しており、スケールが薄く破面の状況がよく観察できた。スケールの状況からみると、前者はゆるやかにクラックが進展した初期の部分で、後者はその後急速にクラックが進展した部分と推定される。ゆるやかにクラックが進展したと思われる部分は、650°C から 800°C へと試験温度が高くなるにつれて、その面積（破面率）が僅かに増大した。

一方、Photo. 4~6に示した組織写真からみると、ゆるやかにクラックが進展した部分(Slow crack部)では、クリープによる引張方向と直角方向へすべり帯と思われるすべり線が観察された。また、破断部近傍の組織変化が著しくなっていた。急速にクラックが進展したと思われる部分(Fast crack部)では、破断部のごく近傍のみに、塑性変形を伴った組織が観察された。

次に、MA957について透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた抽出レプリカ観察結果をPhoto. 7に示す。観察は代表例として700°Cのクリープ破断試験片について行ったものである。破断時間は約4,300hである。クリープ破断試験後は、200Å程度の極微細な析出物から0.1~0.5μm程度の比較的大きな粒を呈した析出物まで観察された。これらの析出物は、極微細な析出物にはTiとYが含まれており、TiとYの複合酸化物であると推定される。また、比較的大きな粒状の析出物はTiCあるいはTiNが同定された。前報³⁾の受け入れ材での観察結果と比較すると、クリープ破断試験後はTiCやTiNの析出が多くなっているように見受けられる。本試験では一試験片のみで評価しているため、今後もさらにクリープや熱時効などに伴う組織変化を詳細に解析する必要がある。

(2) 低サイクル疲労試験後の組織変化

低サイクル疲労試験後のSEMによる破面観察の結果をPhoto. 8~Photo. 10に、光学顕微鏡による組織観察結果をPhoto. 11~Photo. 13にそれぞれ示す。観察は550°C、650°C及び750°Cの代表試験片について行った。

疲労き裂が進展した部分では、疲労破面特有のストライエーションが観察された。試験温度の違いによる有意な差異は認められなかった。また、断面組織の観察結果では、疲労クラックの他に、引張・圧縮の直角方向に二次クラックが多数発生しているのが観察された。このクラックは軸方向に伸びた結晶粒の境界を進んでいるように見受けられる。組織を観察する限りでは、粒界は非常にクラックが進展し易いものと思われ、試験片の採取方向、例えばT方向では疲労寿命に悪影響を与えるものと推定される。したがって、T方向についても試験を実施して確認する必要があると考えられる。

4. 檢 討

4.1 Larson-Millerパラメータ法によるクリープ破断特性の整理

本試験で得られたクリープ試験データを基に、Larson-Millerパラメータ法（以下LMP法という）を用いて整理した。 $LMP = [T \times (C + \log t_R)]$ の定数 C は、破断時間の実測値と予測値の残差平方和が最小になる値をもって決定した。LMP と応力との関係を Fig. 30 及び Fig. 31 (MA957) 並びに Fig. 32 (MA956) に示す。MA957 及び MA956 のそれぞれの主クリープ破断式は以下の通りであった。

MA957 :

$$\begin{aligned} L\text{方向} \quad T \times (49.12000 + \log t_R) &= 3.83317 \times 10^4 + 5.53997 \times 10^4 (\log \sigma) \\ &\quad - 3.15709 \times 10^4 (\log \sigma)^2 \end{aligned} \quad \dots \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T\text{方向} \quad T \times (37.35082 + \log t_R) &= 3.77268 \times 10^4 + 2.78947 \times 10^4 (\log \sigma) \\ &\quad - 1.99873 \times 10^4 (\log \sigma)^2 \end{aligned} \quad \dots \quad (2)$$

MA956 :

$$\begin{aligned} L\text{方向} \quad T \times (18.21913 + \log t_R) &= 2.57384 \times 10^4 - 3.46424 \times 10^3 (\log \sigma) \\ &\quad - 2.61959 \times 10^3 (\log \sigma)^2 \end{aligned} \quad \dots \quad (3)$$

ここで、T は絶対温度(K), t_R はクリープ破断時間(h)及び σ は応力(kg/mm²)である。

上記(1)～(3)式から求めたクリープ破断予測値と実験で得られたクリープ破断実測値との関係を表す係数は、それぞれ MA957 が 0.854 (L 方向), 0.992 (T 方向) 及び MA956 (L 方向) が 0.987 であった。クリープ破断寿命は、 $[T \times (C + \log t_R \cdot \alpha_R)]$ から時間係数 (α_R) を 1.0 にすると、ほぼ安全側に予測することができると思われる。

4.2 高温強度特性の検討

(1) クリープ破断強度

本試験の結果では、MA957 と MA956 とでは Fig. 8 に示したように、明瞭なクリープ破断強度の差がみられた。化学組成からは、 Y_2O_3 (MA957 : 約 0.25%, MA956 : 約 0.5%) の分散強化元素の添加量が異なっている他、特に MA957 では Al 添加の代わりに Ti が約 1% 程度添加されている。MA956 では Al と Y の複合酸化物の分散粒子による強化機構と考えられている³⁾が、MA957 では Photo. 7 に示したように Ti と Y の複合酸化物が形成され、この分散によってより一層強度が高められているものと推定される。さらに、MA957 と MA956 とでは分散粒子の大きさが異なっている³⁾ことも、クリープ破断強度に差が生じた一因であると考えられる。これら強化機構については、今後さらに詳細な検討が必要である。

次に、本試験で得られた MA957 と MA956 のクリープ破断強度 (L 方向) を、原型炉「もんじゅ」用炉心材料の改良 SUS316 ステンレス鋼 (20% 冷間加工材¹⁷⁾) 及び他のフェラ

イト鋼としてT A F鋼($10\text{Cr}-1.5\text{Mo}-\text{V}-\text{Nb}-\text{N}-\text{B}$ ¹⁸⁾)、HT9鋼($12\text{Cr}-1\text{Mo}-\text{W}-\text{V}$ ¹⁹⁾)及び59FK($12\text{Cr}-2\text{Mo}-\text{V}-\text{Nb}$ ²⁰⁾)のそれらと比較した。650°Cにおける比較の結果をFig. 36に示す。

MA957のクリープ破断強度は、数百時間以内の短時間側では改良SUS316ステンレス鋼の強度よりも劣るが、それを越える長時間側では高い強度を示している。また、T A F鋼はこれまでのフェライト鋼の中では最も優れた材料とされているが、MA957に比較すると劣っており、上記の材料の中ではMA957が最強となっている。一方、MA956のクリープ破断強度はHT9鋼よりも高い強度を有しているが、他のフェライト鋼や改良SUS316ステンレス鋼に比較すると、かなり劣っていることがわかる。

長時間側でのクリープ破断強度の比較例として、650°Cで30,000時間でのクリープ破断強度を前述のLMP式から外挿し、現行の「もんじゅ」用改良SUS316ステンレス鋼と比較した。結果をFig. 37に示す。MA957のL方向クリープ破断応力値は、改良SUS316ステンレス鋼に比較すると、約2倍以上の高い値となっている。MA956のクリープ破断応力値は、改良SUS316ステンレス鋼の設計クリープ破断応力強さSR値よりも下回っている。

このように、MA957のクリープ破断強度は現行の改良SUS316ステンレス鋼やこれまでに開発された他のフェライト系耐熱鋼に比較して、かなり優れた特性を示すことが明らかになった。しかし、MA957は前章で述べたように強度に対する異方性が認められており、T方向のクリープ破断強度はL方向のそれらに比較して著しく低下している。このことは、実機の燃料被覆管を考慮した場合、FPガスによる内圧は主にT方向に応力が作用することになり、強度の低下が予想される。この点は今後の課題である。

(2) 低サイクル疲労特性

MA957の疲労特性とSUS316¹³⁾及びMod.9Cr-1Mo鋼²¹⁾との疲労特性の比較を温度毎にFig. 38~Fig. 40に示す。SUS316及びMod.9Cr-1Mo鋼は、平均疲労破損式から求めた曲線を示した。MA957の疲労寿命は、SUS316の平均疲労寿命よりも短く、高ひずみ側になるほど両者の差が顕著となる傾向を示している。低ひずみ側ではSUS316の疲労寿命に近付く傾向がある。

疲労試験後の組織観察の結果では、Photo. 12~14に示したように引張・圧縮の直角方向に二次クラックが多く発生しているのが観察された。このクラックは圧延方向に伸びた結晶粒の境界を進んでいる可能性が高く、試験片の採取方向、つまりT方向に対する疲労寿命の低下が懸念される。さらに多くのデータ取得や解析結果を持って評価する必要はあるが、実機での起動・停止などの内圧変化に伴う疲労を考えると、クリープと同様にT方向の疲労特性を把握する必要があると思われる。

5. 結 言

高速炉用長寿命炉心材料の開発の一環として、酸化物分散強化型フェライト鋼 INCOLOY MA 957 及び MA 956 の大気中におけるクリープ試験 (600~800°C) 及び低サイクル疲労試験 (550~750°C)，並びに物理的性質に関する試験を実施し、基本的な材料特性を評価した。

本試験によって得られた主な結果は以下の通りである。

クリープ特性：

- (1) MA 957 のクリープ破断強度は時間依存性が小さく、千時間を超える長時間側では従来の改良 SUS 316 ステンレス鋼 (20% 冷間加工材) を上回る優れた強度を示した。ただし、試験片の採取方向に対する強度の異方性が認められ、圧延方向に直角な方向ではクリープ破断強度の低下がみられた。MA 956 のクリープ破断強度は、MA 957 の強度よりも著しく低下していた。これは、主に強化組成や分散粒子の大きさの相違などによるものと推定される。
- (2) MA 957 のクリープ破断延性は最大でも約 5% 程度と低く、600~800°C の温度域では温度及び時間依存性が小さい。また、三次クリープ領域をほとんど示さない特性をもった材料である。MA 956 は 650°C 以下で、かつ千時間以内の短時間破断では 20% を超える高い延性が得られたが、高温・長時間側では MA 957 並の値に低下する傾向を示した。
- (3) クリープ破面の形態は、三角状に端部から中央部に向けて進んだ破面と、ディンプルパターンを示す破面の両者が観察された。破面の状況から、前者はゆるやかにクラックが進展した初期の部分で、後者はその後比較的速くクラックが進展した部分と推定される。

疲労特性：

- (4) MA 957 の低サイクル疲労寿命は、ひずみ範囲が 1% 以下の領域では SUS 316 の寿命よりも僅かに低下した。また、550°C から 750°C の高ひずみ側において、MA 957 は繰り返しに伴う硬化現象を示した。
- (5) 疲労試験後の組織には、疲労によるクラックの他に引張・圧縮と直角方向に、結晶粒の境界に沿った二次クラックの発生が認められ、クラックが進展し易い粒界になっているものと思われる。

物理的性質：

- (6) MA 957 の物理的性質は、マルテンサイト系の SUS 410 と類似していた。

以上、本試験では、酸化物分散強化型フェライト鋼 MA 957 及び MA 956 のクリープ及び低サイクル疲労特性並びに物理的性質に関する基本的な材料特性を把握することができた。しかし、本材料はクリープ特性に対する異方性を示すことなどから、実機の燃料被覆管の F P ガスによる内圧応力を考慮した場合、強度の低下が考えられる。これらは今後の課題である。

終わりに、本計画遂行にあたり御指導を賜った燃料材料開発部燃料材料技術開発室、野村茂雄室長代理及び奥田隆成研究員を始めとする関係者の方々に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 甲野啓一, 榎戸裕二, 「高速炉燃料の高性能化」, 原子力工業 Vol.32, No.10 (1986)
- 2) 柴原 格, 「高燃焼度における高速炉燃料の挙動と長寿命燃料の開発」, 動燃技報 No.57 (1986)
- 3) 奥田隆成, 野村茂雄, 他, 「酸化物分散強化型フェライト鋼 INCOLOY MA957, MA956 材料データ集」, PNC ZN9450 87-004 (1987)
- 4) 飯塚昇司, 野村茂雄, 他, 「酸化物分散強化型フェライト鋼の基本特性評価, (1)高温強度特性の評価」, 日本原子力学会, 昭62秋の大会, J68 (1987)
- 5) 三村裕幸, 吉田英一, 他, 「同 上, (2)ナトリウム中腐食特性の評価」, 日本原子力学会, 昭62秋の大会, J69 (1987)
- 6) 中島元治, 柚原俊一, 他, 「同 上, (3)スエリング特性の評価」, 日本原子力学会, 昭62秋の大会, J70 (1987)
- 7) 野村茂雄, 奥田隆成, 他, 「同 上, (4)加工特性と高速炉燃料被覆管への適用性評価」, 日本原子力学会, 昭62秋の大会, J71 (1987)
- 8) 例えば, T.J.Kelly, "Joining mechanical alloys for fabrication", Inco Alloy Products Company Research Center レポート
- 9) 立石嘉徳, 他, 「高速炉炉心材料用改良SUS316ステンレス鋼の開発」日本原子力学会誌, Vol.30, No.11(1988) p.1005
- 10) 例えば, 土田 豊, 他, 「SUS304鋼, SUS321鋼及び $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の大気中疲労試験」, PNC SN941 85-169 (1985)
- 11) INCO社 MA956カタログ
- 12) 「高速原型炉燃料集合体及び炉心構成要素, 設計用物性値集」, PNC SN241 85-23(1) (1985)
- 13) 「高速原型炉燃料集合体の構造設計方針, 材料強度基準(案)」PNC SN241 85-22(1) (1985)
- 14) Jack R.Lewis, "Physical Properties of Stainless Steel", Hand book of stainless steel, Chapter 19. Mc Grow hill co., (1977)
- 15) 長谷川監修, 「ステンレス鋼便覧」, 日刊工業新聞社 (1973)
- 16) 日本鉄鋼協会編, 「第3版 鉄鋼便覧 I 基礎」, 丸善発行 (1981)
- 17) FBR材料専門委員会, クリープサブグループ, 「高速炉用燃料被覆管のクリープ試験(第11次クリープ試験)」, PNC SN241 82-24 (1982)
- 18) 藤田利夫, 他, 「V, Nb, Bを含む12%Cr耐熱鋼の長時間クリープ破断強度に及ぼすMo, Wの影響」, 鉄と鋼, Vol.61, No.3(1975), p.357

- 19) F.R.Shober, "The Physical and Mechanical Properties of Alloy HT-9", Attachment 2, (1984) p.34
- 20) FBR燃料材料専門委員会, クリープサブグループ, 「高速炉用燃料被覆管のクリープ試験(第15次クリープ試験)」, PNC SN241 (1987)
- 21) KOM-MSSワーキング・グループ, 「高速増殖炉高温構造設計基準材料強度基準等の高度化に関する検討報告(I)」, PNC SN9410 88-105 (1988)

Table 1 MA957, MA956 の化学成分

鋼種			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Y ₂ O ₃	O	N
MA957	ミルシート	板 ^{*1}	0.015	—	—	—	—	14.36	—	—	0.31	0.99	—	—	0.19	—
		管 ^{*2}	0.014	0.03	0.06	<0.005	0.006	14.20	0.24	0.01	0.30	1.0	—	0.27	0.21	0.036
	分析値	板	0.017	0.044	0.038	<0.003	0.0049	13.90	0.13	0.031	0.31	1.00	0.049	0.27	0.18	0.053
		管	0.012	0.029	0.047	0.0017	0.0066	14.09	0.23	0.012	0.31	1.01	0.062	0.25	0.186	0.0347
MA956	ミルシート	—	—	—	—	—	—	20.21	—	—	—	0.35	4.35	0.52	0.22	0.048
	分析値	0.018	0.13	0.11	0.011	0.003	20.02	0.09	0.026	0.004	0.36	4.38	0.47	0.23	0.033	

* 1 板材 (1 mm^t × 915 mm^w × 1200 mm^ℓ)* 2 热押素管 (63.5 mm^{OD} × 9.5 mm^t × 3000 mm^ℓ)Table 2 室温及び高温引張特性³⁾

鋼種		試験温度(℃)	0.2%耐力(kg/mm ²)	引張強さ(kg/mm ²)	破断伸び(%)
MA957	板	R.T	94.4	105.0	11.0
		R.T	97.4	102.6	11.0
		650	38.7	45.5	8.3
		650	39.3	46.9	18.0
	管	R.T	98.3	112.7	18.3
		R.T	100.8	113.4	21.0
		650	36.2	43.5	32.7
		650	40.1	44.6	23.0
MA956	板*	R.T	60.6	81.3	20.0
		R.T	56.2	79.1	19.8
		650	19.5	25.4	52.7
		650	12.3	24.2	47.8

* 2 mm^t × 6 w × 30G.L

Table 3 クリープ破断試験条件

(対象鋼種: MA957, MA956)

材 料 項 目	MA957	MA956
試験温度(℃)	600, 650, 700, 750, 800	600, 650, 700, 800
目標破断時間(h)	100~3,000	100~3,000
試験雰囲気	大 気 中	大 気 中

Table 4 低サイクル疲労試験条件

(対象鋼種: MA957)

試 驗 機	単軸引張圧縮型疲労試験機(電気油圧サーボ式)
制 御	定ひずみ制御(試験片平行部 20mm)
負 荷 波 形	三角波
ひずみ速度(%/sec)	0.1
ひずみ範囲(%)	0.5~1.2
試 験 温 度 (℃)	550, 650, 750

Table 5 酸化物分散強化型フェライト鋼MA957のクリープ試験結果（L方向）

温度 (°C)	応力 (kg/mm ²)	破断時間 (hrs)	破断伸び (%)	破断絞り (%)	定常クリープ 速度 (%/hr)	備 考
600	43.0	197.0	3.5	5.4	6.73×10^{-2}	
	42.0	48.4	3.6	24.1	2.80×10^{-1}	
	41.0	947.6	2.8	2.7	1.16×10^{-3}	
	40.0	5582.8	3.7	13.0	1.56×10^{-4}	
	38.0	(9887.8)	(0.6)	—	—	中 断
	37.0	(10135.6)	(0.5)	—	1.27×10^{-5}	中 断
	34.0	(11168.6)	(0.1)	—	1.21×10^{-5}	中 断
650	39.0	13.9	4.8	10.0	8.54×10^{-2}	
	38.5	107.4	3.0	1.2	7.72×10^{-3}	
	38.3	191.5	2.1	2.3	3.45×10^{-3}	
	37.8	10.4	4.5	28.8	1.33×10^{-1}	
	36.5	2445.5	1.9	6.9	1.53×10^{-4}	
	33.0	(10004.8)	(0.5)	—	—	中 断
	32.0	(10659.3)	(0.4)	—	9.54×10^{-6}	中 断
	28.0	(11167.6)	(0.2)	—	1.26×10^{-5}	中 断
700	32.0	359.7	3.8	45.1	1.25×10^{-3}	
	31.0	2292.2	2.8	4.2	1.28×10^{-4}	
	29.5	4268.7	2.8	3.6	8.12×10^{-5}	
	27.5	(10003.1)	(0.3)	—	1.63×10^{-5}	中 断
	25.0	(10976.7)	(0.1)	—	1.15×10^{-6}	中 断
750	27.5	143.4	2.6	6.5	1.33×10^{-3}	
	27.0	522.8	2.7	6.8	4.65×10^{-4}	
	26.5	457.5	3.3	5.3	5.31×10^{-4}	
	25.5	1926.3	0.5	~0	6.08×10^{-5}	
800	24.5	46.1	0.4	5.4	5.30×10^{-3}	
	24.0	20.8	2.9	~0	5.42×10^{-2}	
	23.5	87.0	2.9	9.3	1.00×10^{-3}	
	22.0	3134.0	0.3	4.1	7.26×10^{-5}	

Table 6 酸化物分散強化型フェライト鋼MA957のクリープ試験結果(T方向)

温度 (°C)	応力 (kg/mm ²)	破断時間 (hrs)	破断伸び (%)	破断絞り (%)	定常クリープ 速度 (%/hr)	備考
650	30.0	9.6	9.4	—	5.46×10^{-1}	
	30.0	7.4	10.4	—	6.82×10^{-1}	
	28.0	70.4	5.4	—	3.50×10^{-2}	
	27.0	248.0	3.5	—	5.73×10^{-3}	
	25.0	3052.0	3.9	—	3.92×10^{-4}	
700	23.5	115.5	5.4	—	1.90×10^{-2}	
	23.5	143.1	5.5	—	1.40×10^{-2}	
	23.0	323.4	4.2	—	3.90×10^{-3}	
	22.5	256.9	3.3	—	1.33×10^{-3}	
	22.0	893.6	3.5	—	9.27×10^{-4}	

Table 7 酸化物分散強化型フェライト鋼MA956のクリープ試験結果（L方向）

温度 (°C)	応力 (kg/mm ²)	破断時間 (hrs)	破断伸び (%)	破断絞り (%)	定常クリープ 速度(%/hr)	備考
600	15.0	267.2	30.1	56.9	2.89×10^{-2}	
	13.5	786.0	21.4	48.5	8.86×10^{-2}	
	12.5	1893.7	30.8	30.8	4.77×10^{-3}	
650	11.0	886.2	10.6	14.6	5.73×10^{-2}	
	10.0	1493.3	2.5	7.3	2.55×10^{-2}	
	23.0	0.3	45.0	—	—	
	20.0	0.6	56.7	—	—	
	16.0	6.0	38.0	—	—	
	16.0	22.6	23.0	—	—	
	12.0	75.8	28.2	—	—	
700	8.5	559.4	6.9	17.4	4.32×10^{-2}	
	8.0	606.7	6.9	6.0	4.01×10^{-2}	
	7.0	2222.6	4.5	10.0	5.50×10^{-4}	
800	5.4	134.0	7.5	31.0	1.80×10^{-2}	
	5.0	158.8	6.5	8.8	5.84×10^{-2}	
	4.7	281.1	3.2	6.4	5.09×10^{-3}	
	4.3	588.7	5.2	2.7	1.94×10^{-4}	
	3.0	(11430.2)	(0.5)	—	3.33×10^{-5}	中 断

Table 8 MA957 の低サイクル疲労試験結果

試験温度 (℃)	試験片番号	全ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_t$ (%)	塑性 ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_p$ (%)	弾性 ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_e$ (%)	応力範囲 ΔR (Kg/mm)	破損繰り返し数 N_f (cycles)	破断位置
550	7MF-22	1.196	0.551	0.645	129.2	407	B
	-1	0.995	0.387	0.608	124.5	1224	B
	-3	0.795	0.200	0.595	120.1	2440	A/B
	-11	0.593	0.068	0.525	109.0	5675	B
650	7MF-7	0.993	0.416	0.577	89.4	789	A
	-19	0.795	0.280	0.515	86.0	1574	B
	-12	0.496	0.077	0.419	70.3	7247	B
	-16	1.196	0.662	0.534	89.5	384	B
750	7MF-9	0.793	0.382	0.411	55.8	771	B
	-10	0.995	0.575	0.420	55.7	547	B
	-21	0.698	0.296	0.402	57.6	947	B
	-20	0.497	0.122	0.375	51.8	5469	B

Table 9 MA957 の物理的性質

(a) 密度

温 度 (°C)	密 度 (g/cm³)
20	7.674

(b) 比熱

温 度 (°C)	比 热 (cal/g·°C)
20	0.109
50	0.114
100	0.120
150	0.125
200	0.128
250	0.132
300	0.137
350	0.142
400	0.148
450	0.142
500	0.167
550	0.178
600	0.191
650	0.210
700	0.243
710	0.257
750	0.185
800	0.168

(c) 热伝導度

温 度 (°C)	热 传 导 度 (w/cm·°C)
20	0.2611
200	0.2782
400	0.2640
600	0.2741
800	0.2648

Table 9 (続き)

(d) 热膨胀係数

温 度 (°C)	热膨胀係数 [*] ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
100	10.5
200	10.7
300	10.8
400	11.1
500	11.4
600	11.4
700	11.3
800	11.5
900	11.9

(e) ヤング率

温 度 (°C)	ヤング率 (10^3kgf/mm^2)
23	22.7
100	22.4
200	21.9
300	21.1
400	20.3
500	19.2

(f) ポアソン比

温 度 (°C)	ポアソン比
20	0.31

*: 平均

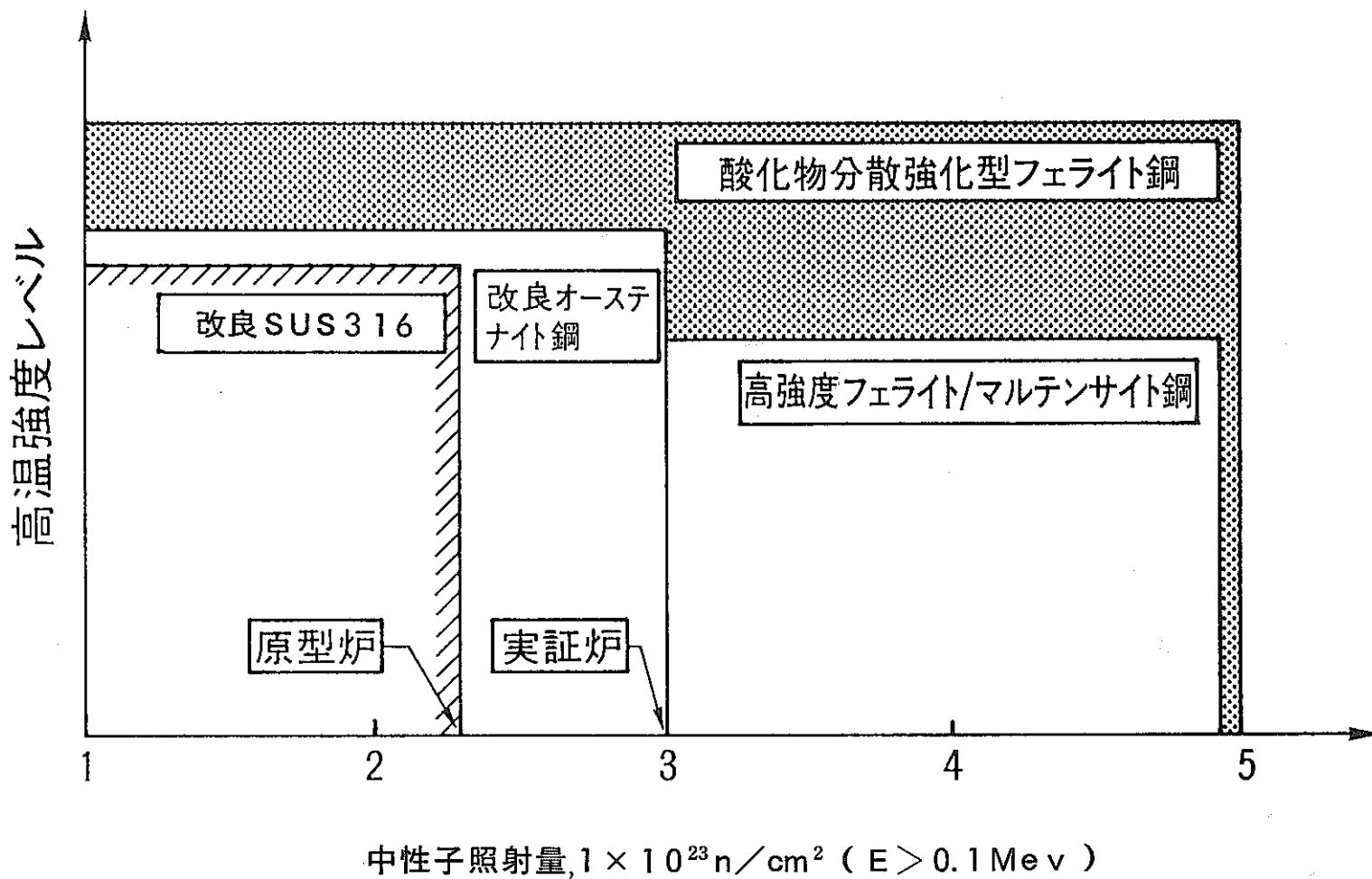


Fig. 1 高速炉用燃料被覆管材料の開発目標

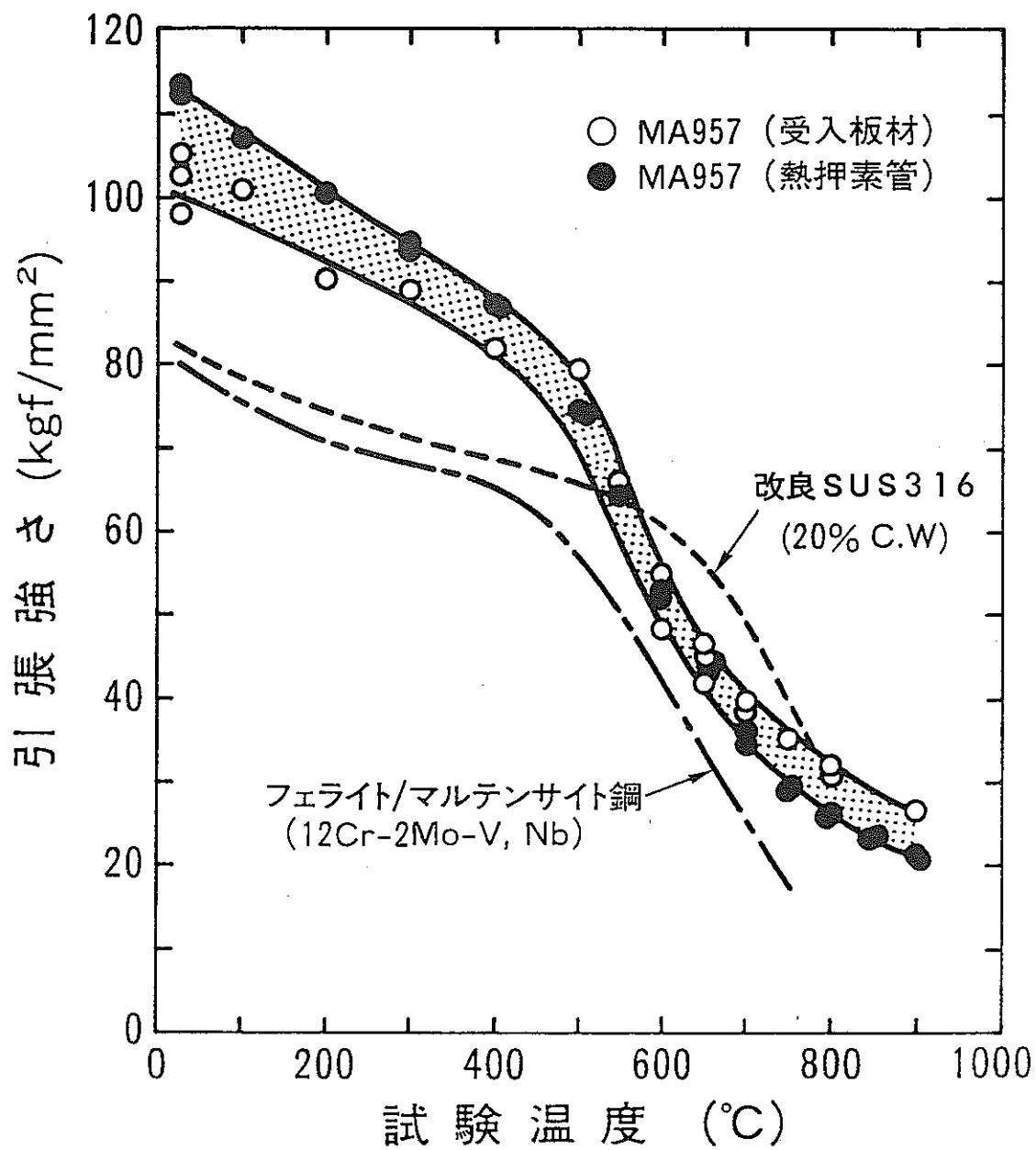


Fig. 2 MA957 の引張強さ⁴⁾

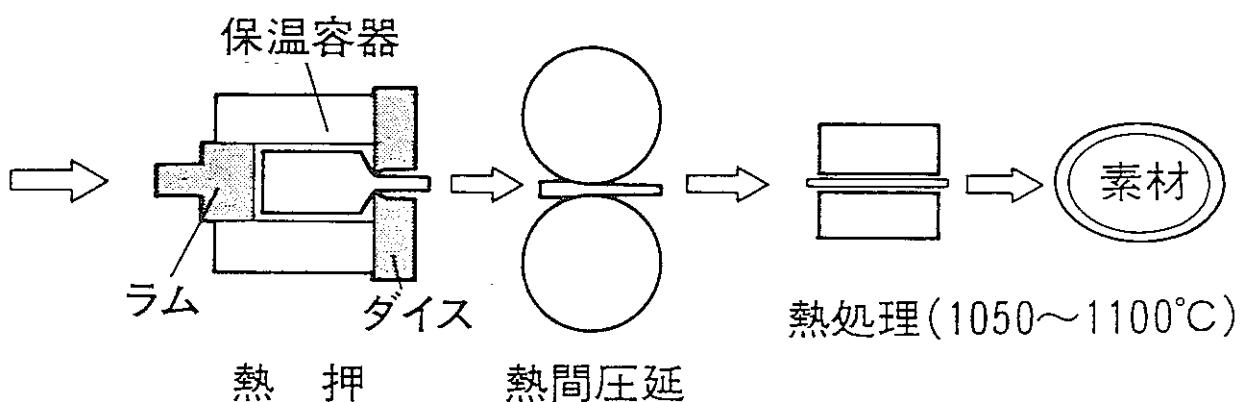
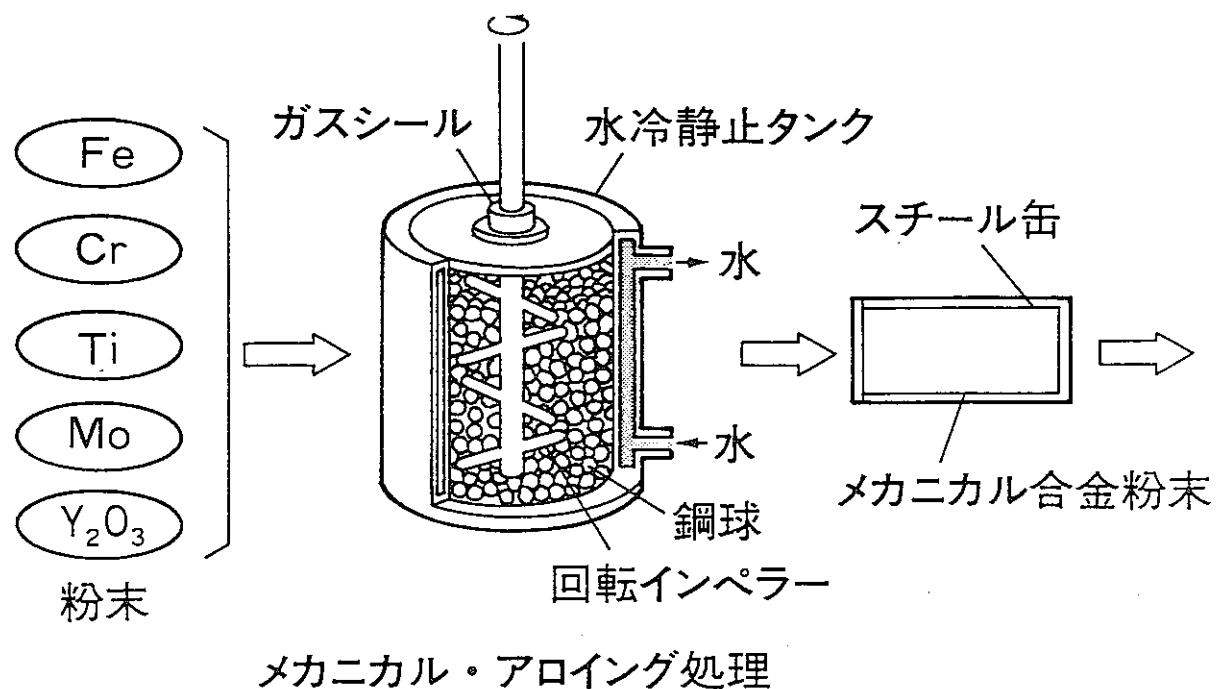
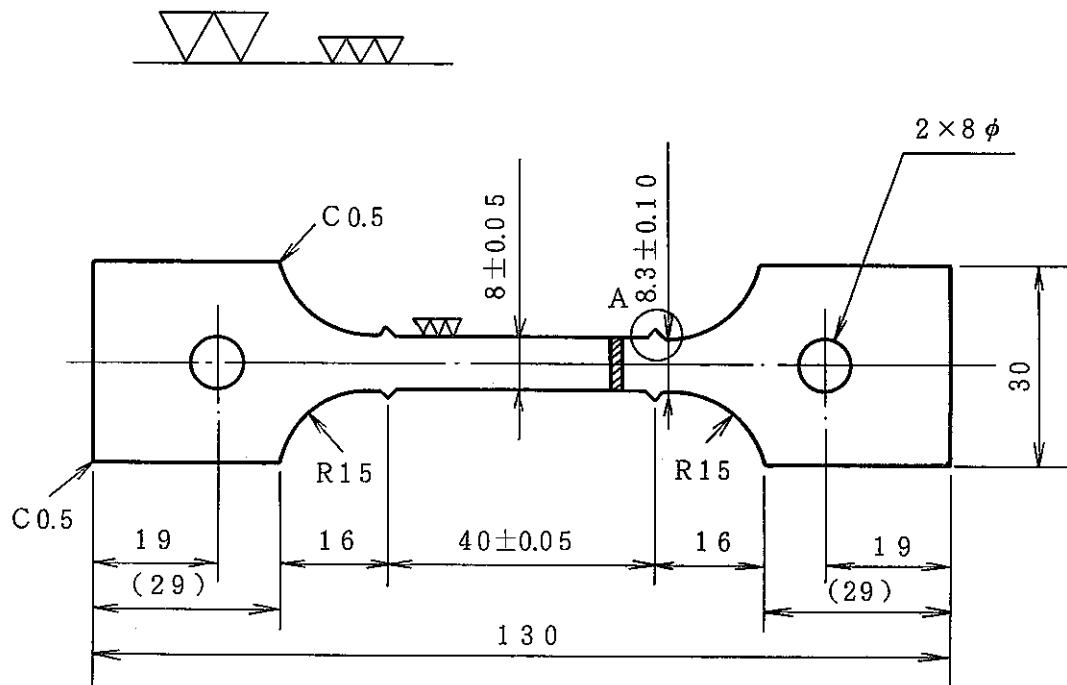


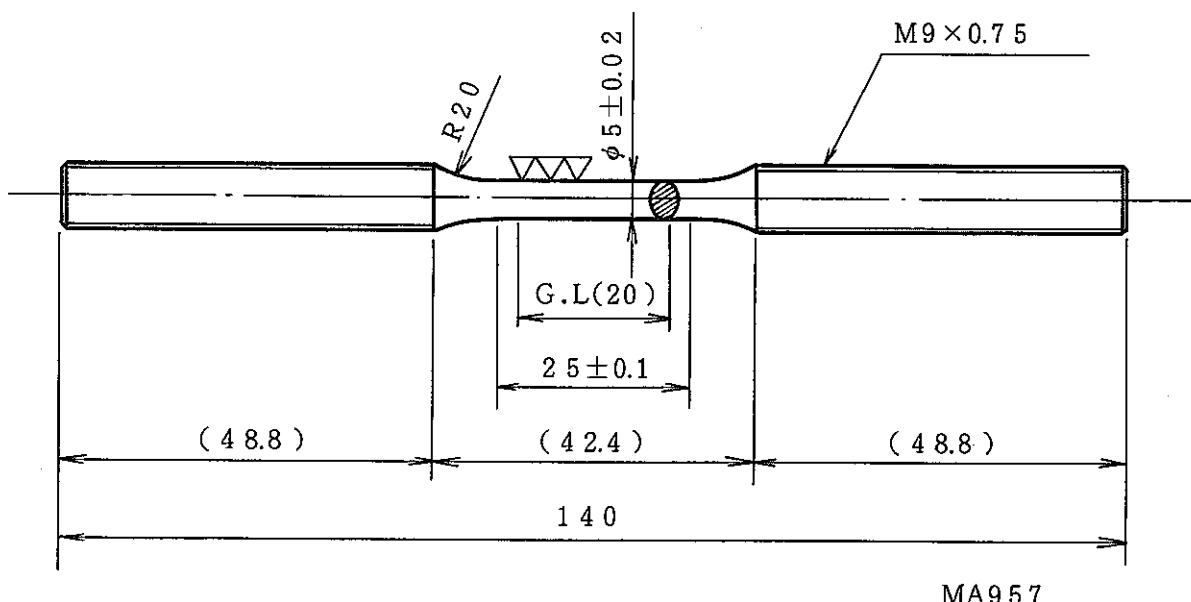
Fig. 3 酸化物分散強化型フェライト鋼の製造工程



板厚 MA957 : 1mm

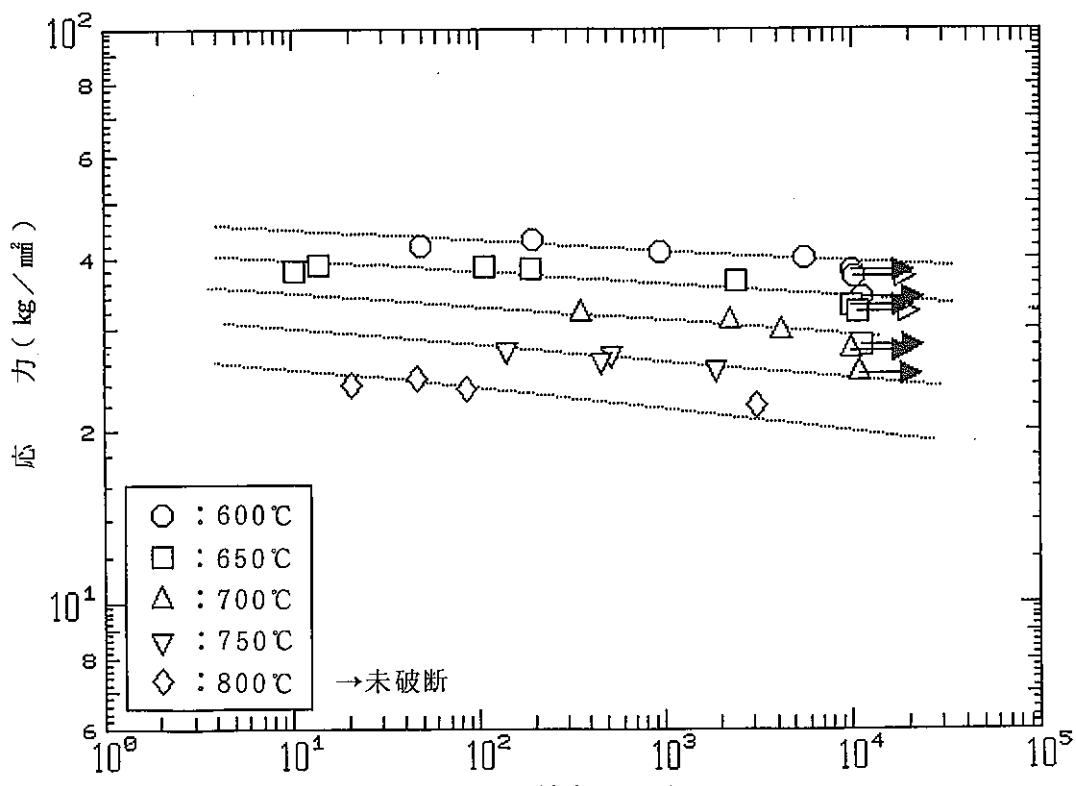
MA956 : 2mm

Fig.4 クリープ試験片形状 (mm)

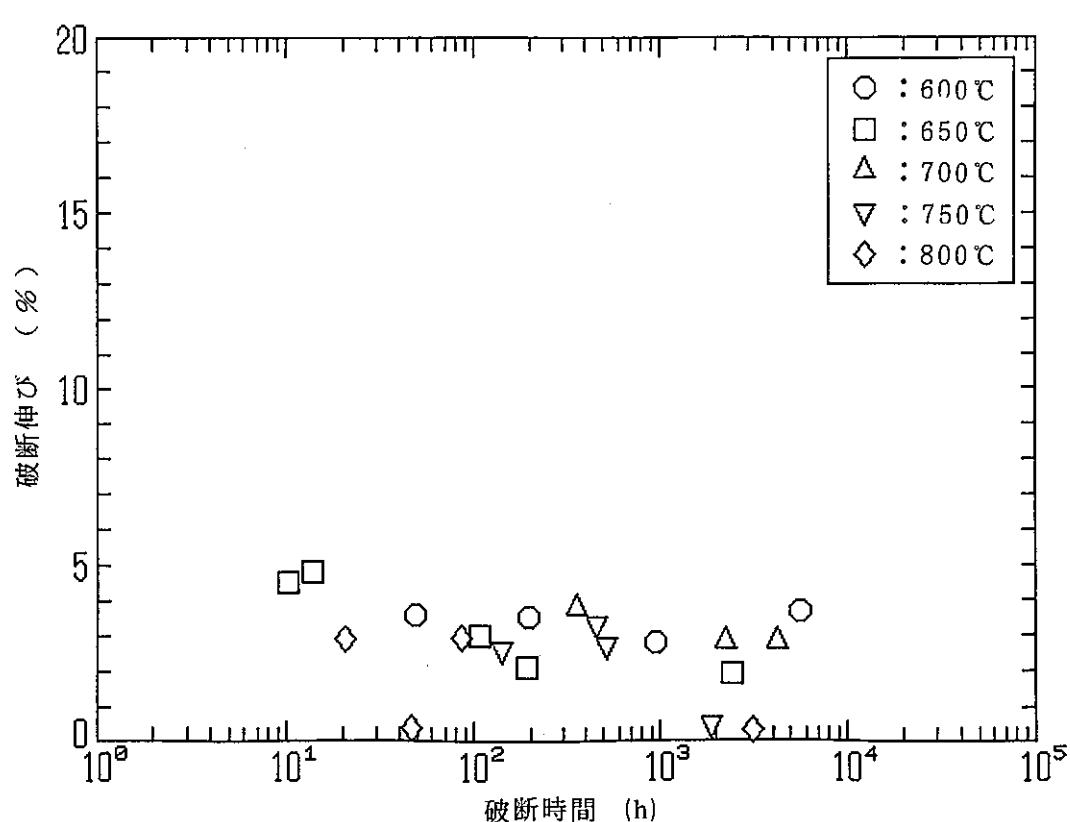


MA957

Fig.5 低サイクル疲労試験片形状 (mm)



(a) クリープ破断強度



(b) クリープ破断伸び

Fig.6 MA957 の大気中クリープ破断特性 (L方向)

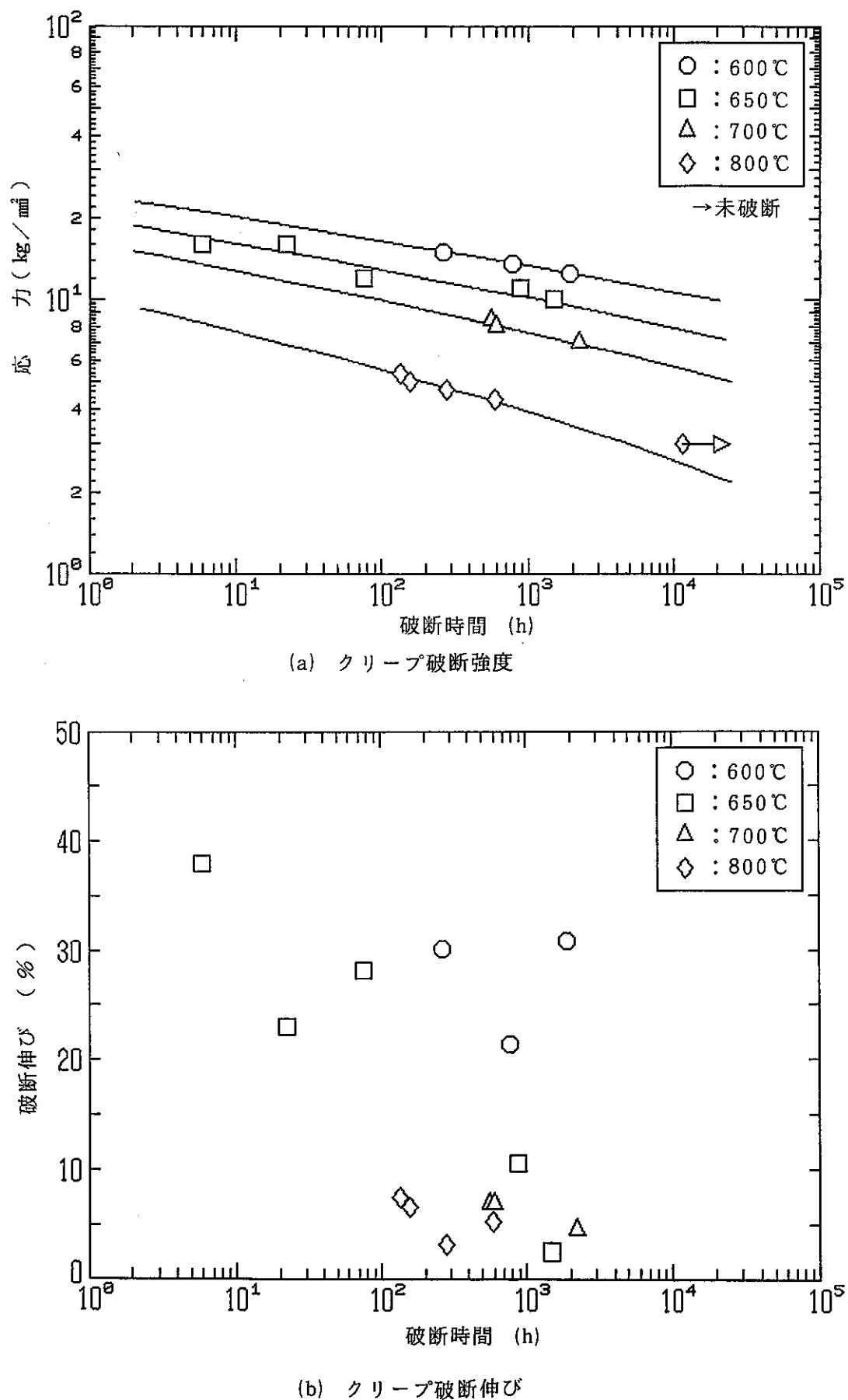
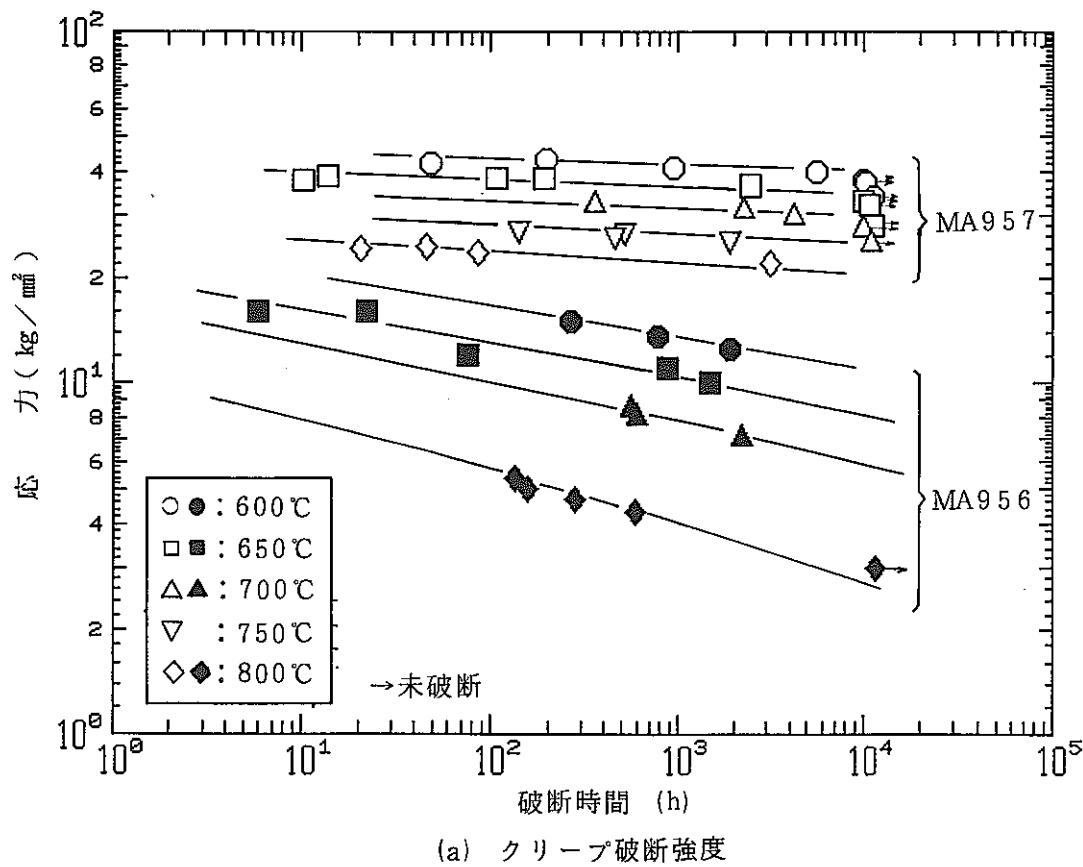
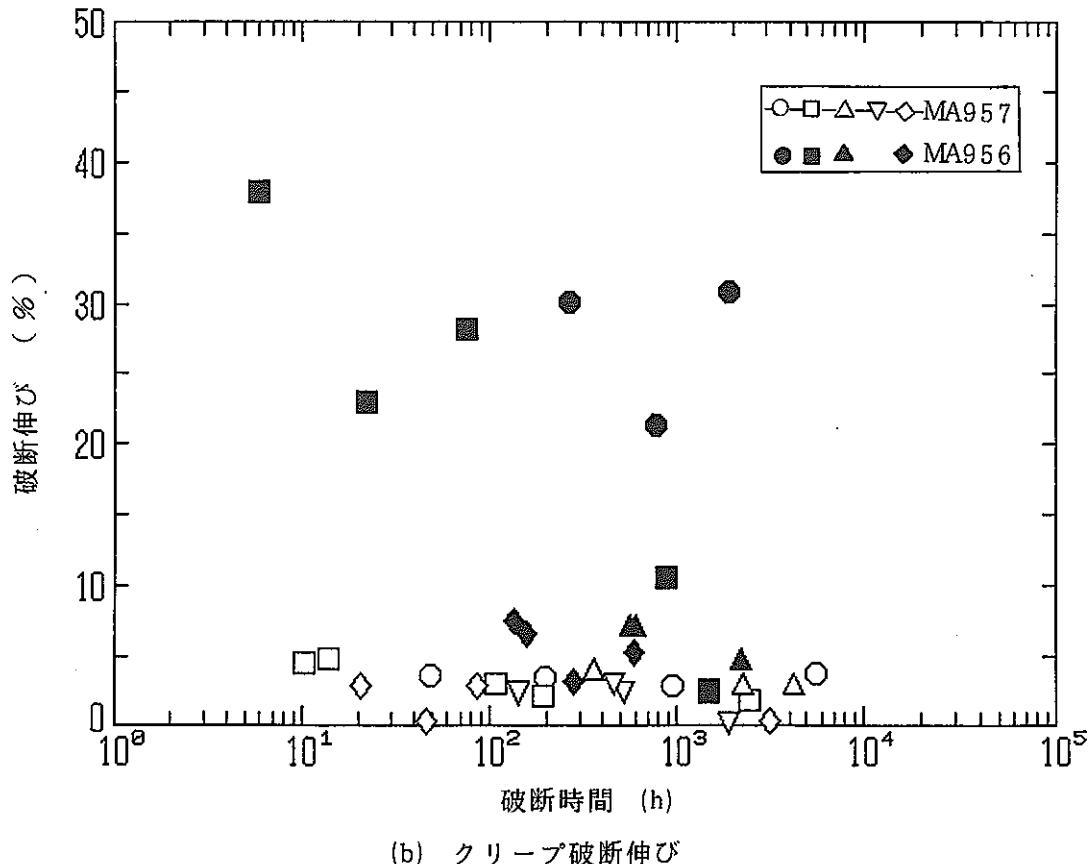


Fig. 7 MA956 の大気中クリープ破断特性 (L 方向)



(a) クリープ破断強度



(b) クリープ破断伸び

Fig. 8 MA957 と MA956 とのクリープ破断特性の比較 (L方向)

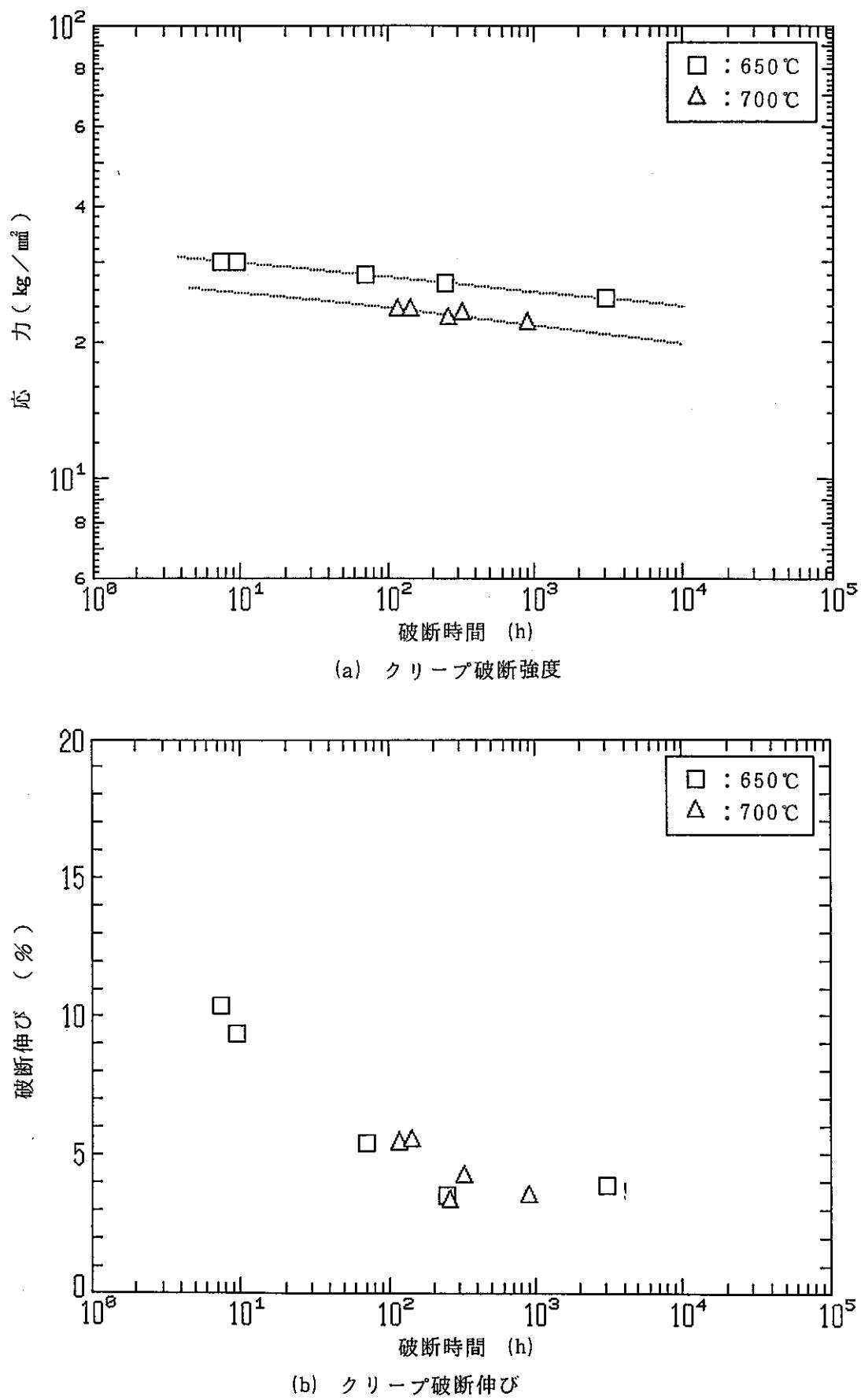


Fig.9 MA957 の大気中クリープ破断特性 (T方向)

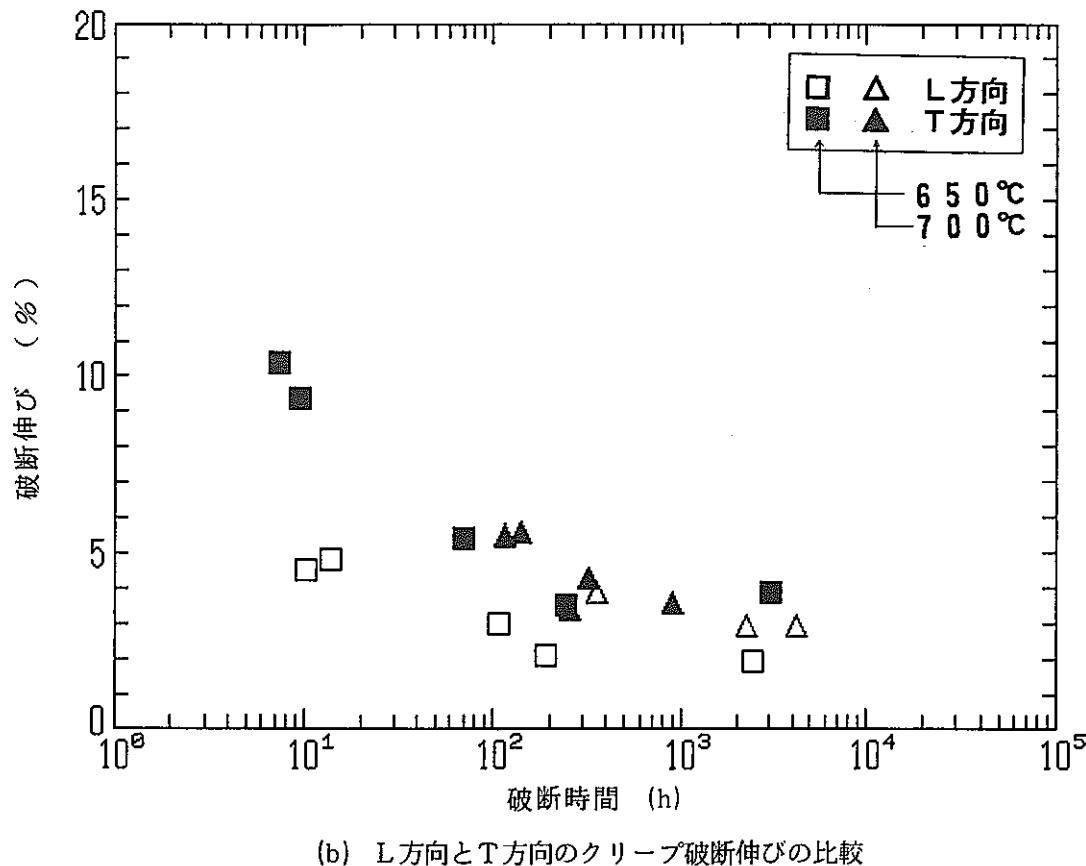
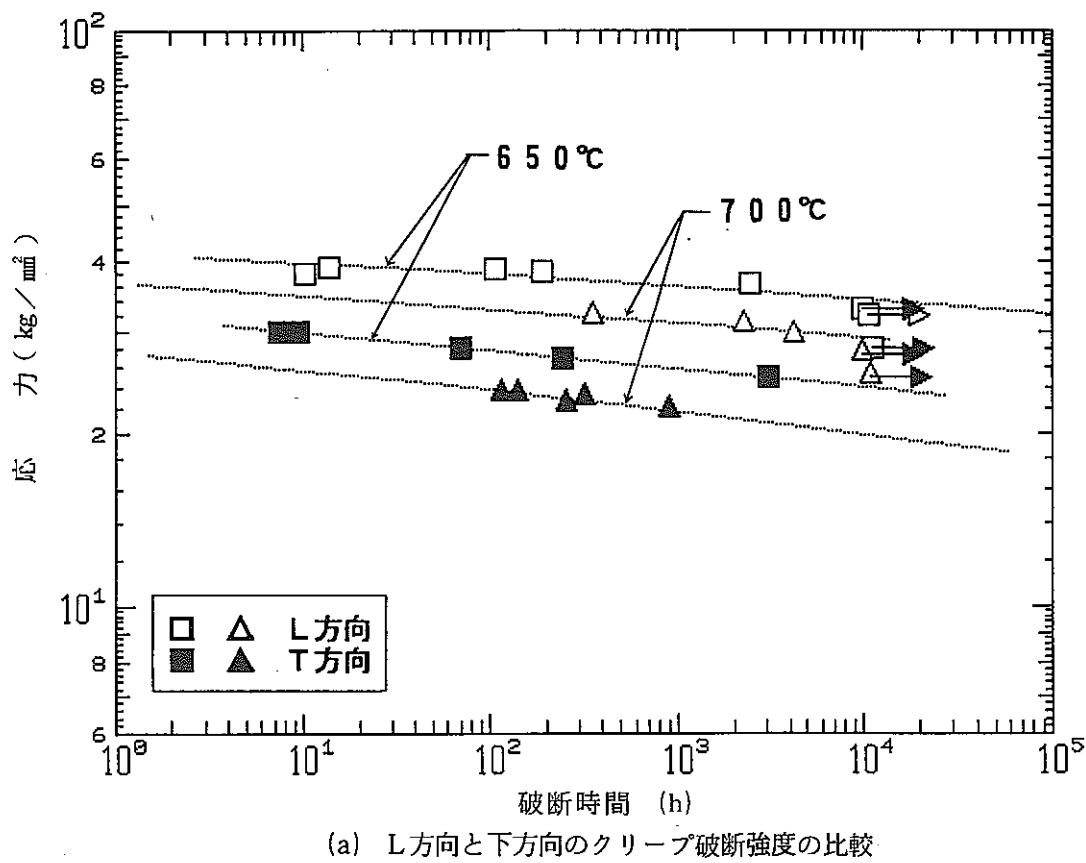


Fig.10 クリープ破断特性に及ぼす試験片採取方向の影響

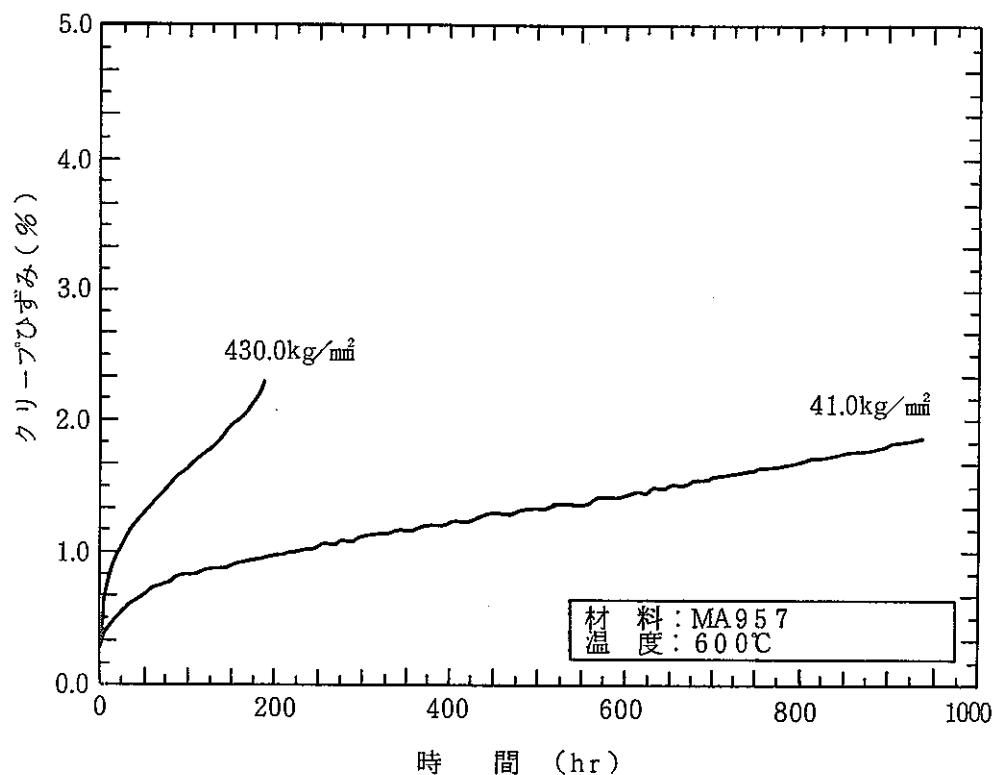


Fig.11 MA957の600°Cにおけるクリープ曲線

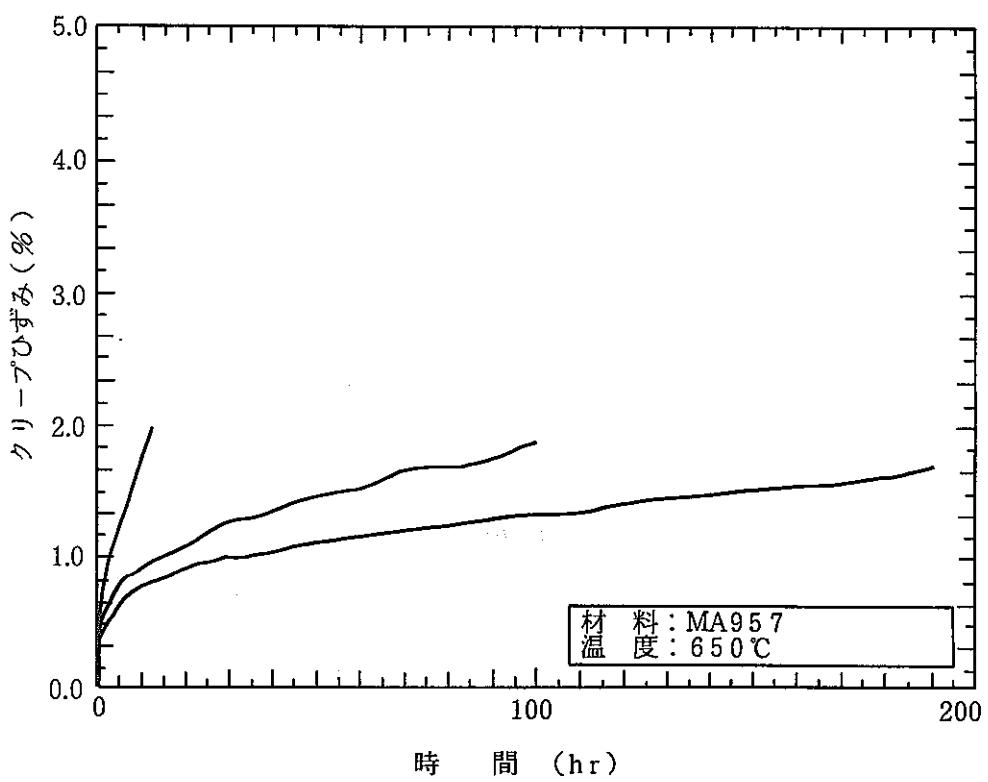


Fig.12 MA957の650°Cにおけるクリープ曲線

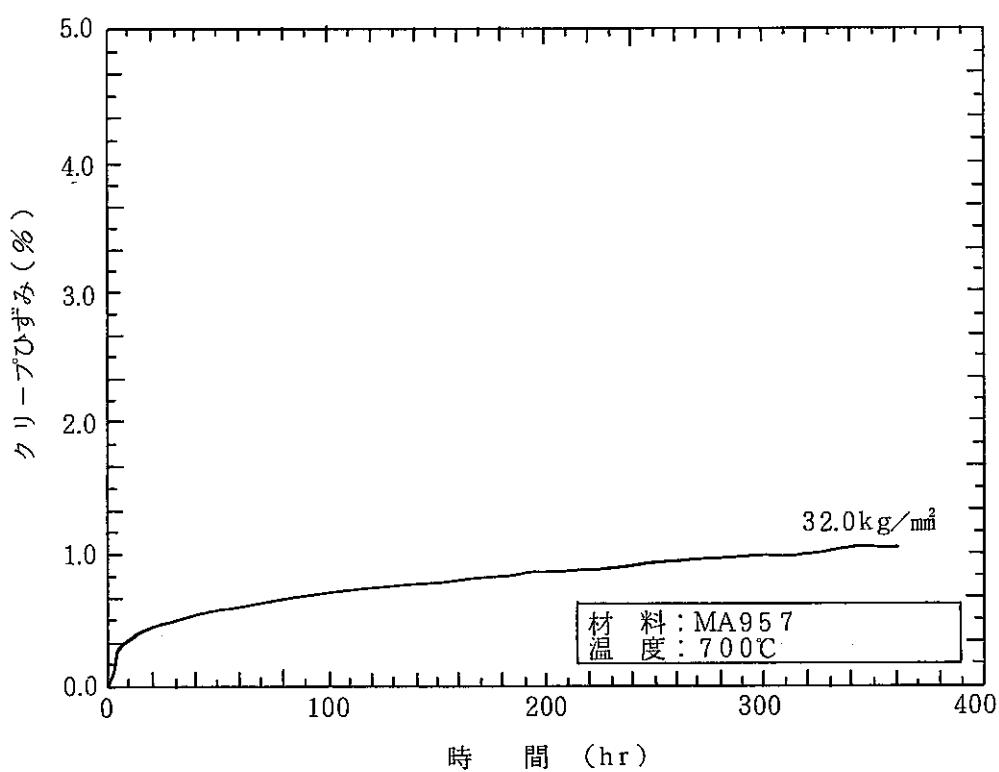


Fig.13 MA 957 の 700°C におけるクリープ曲線

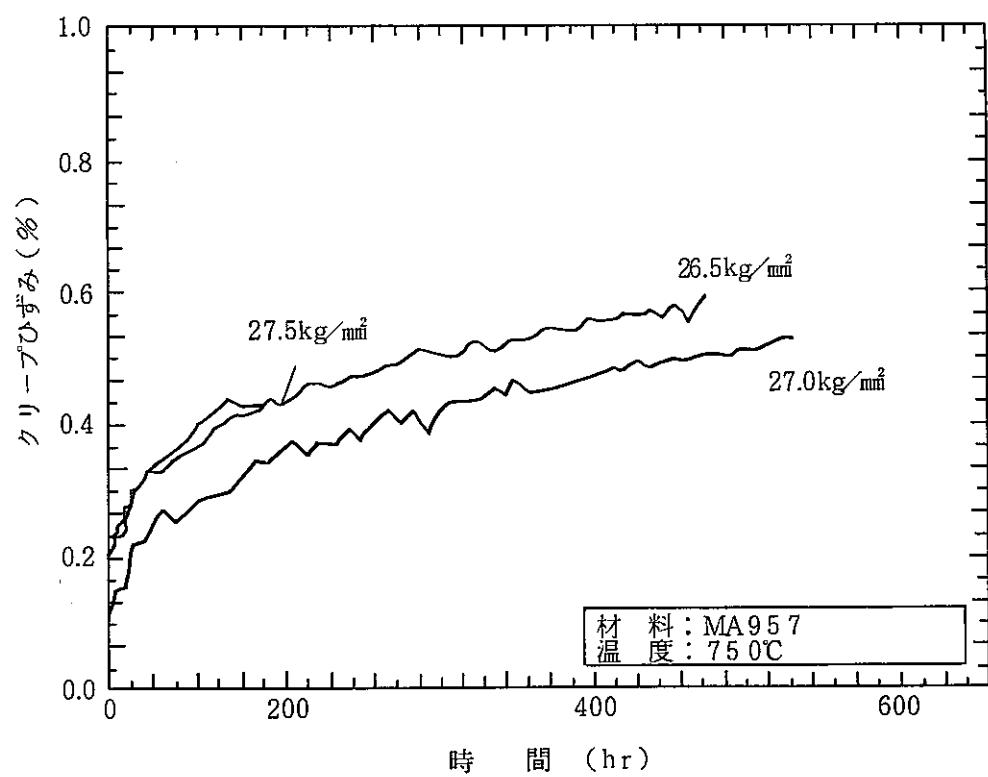


Fig.14 MA 957 の 750°C におけるクリープ曲線

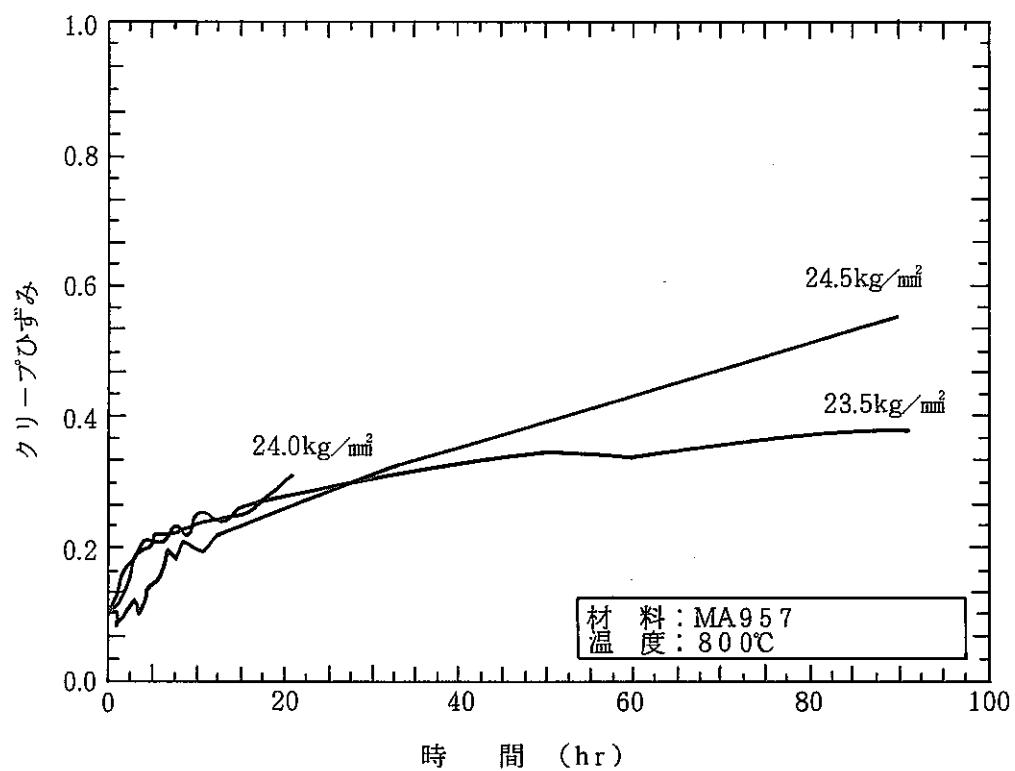


Fig.15 MA 957 の 800°C におけるクリープ曲線

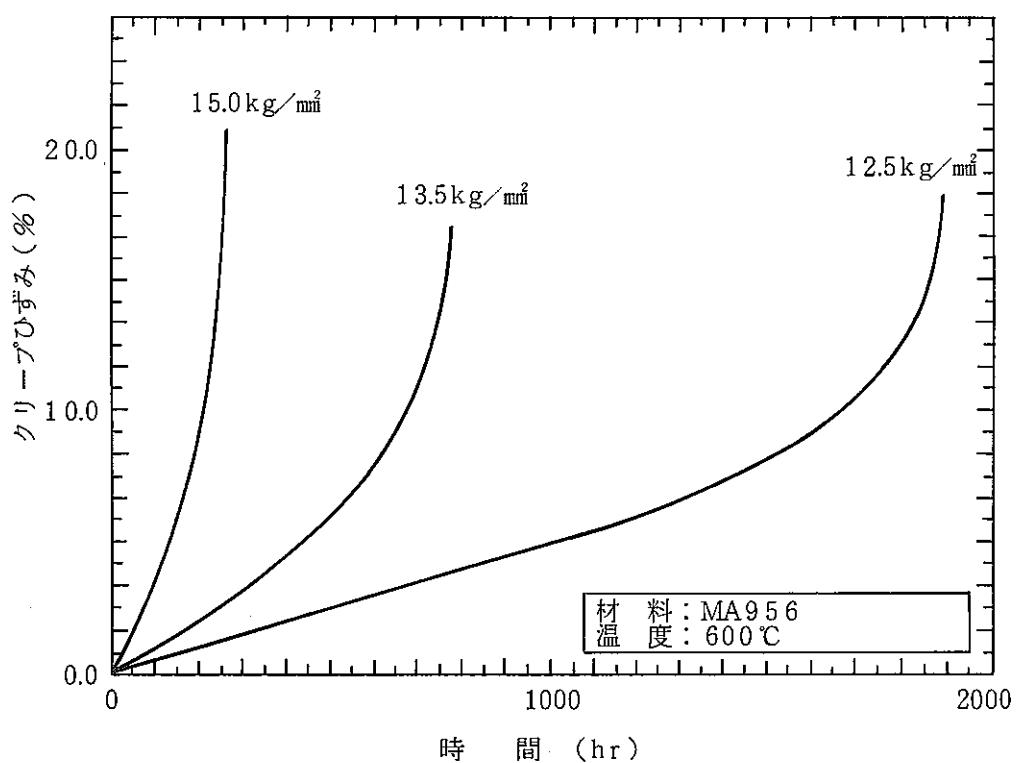


Fig.16 MA956の600°Cにおけるクリープ曲線

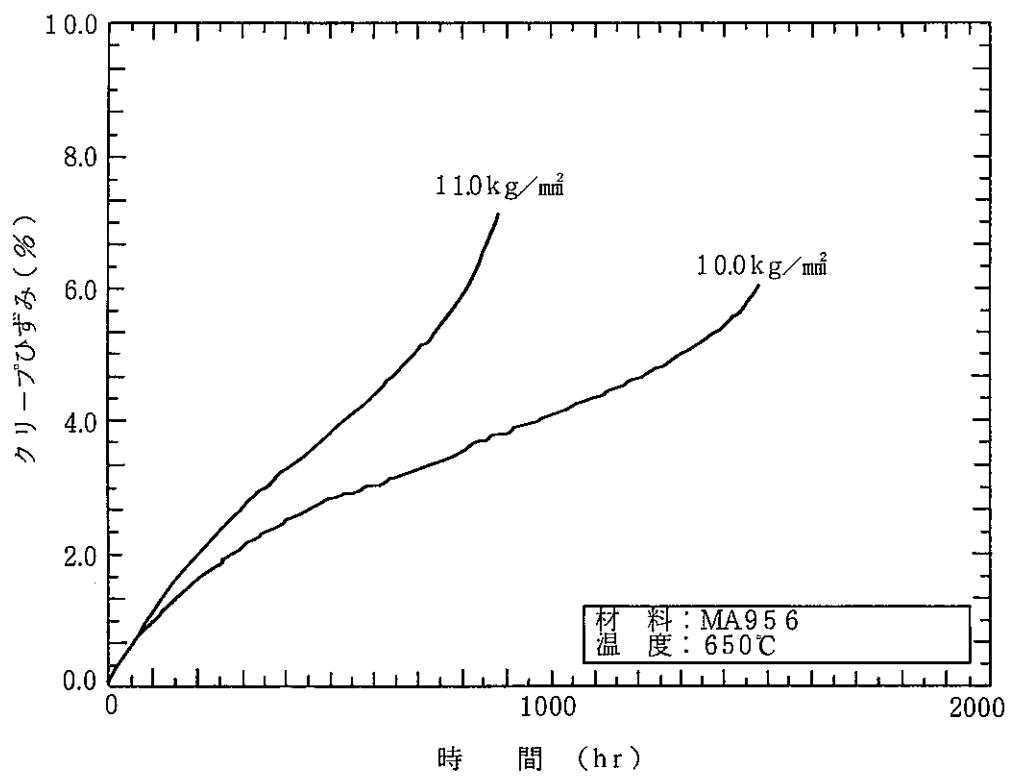


Fig.17 MA956の650°Cにおけるクリープ曲線

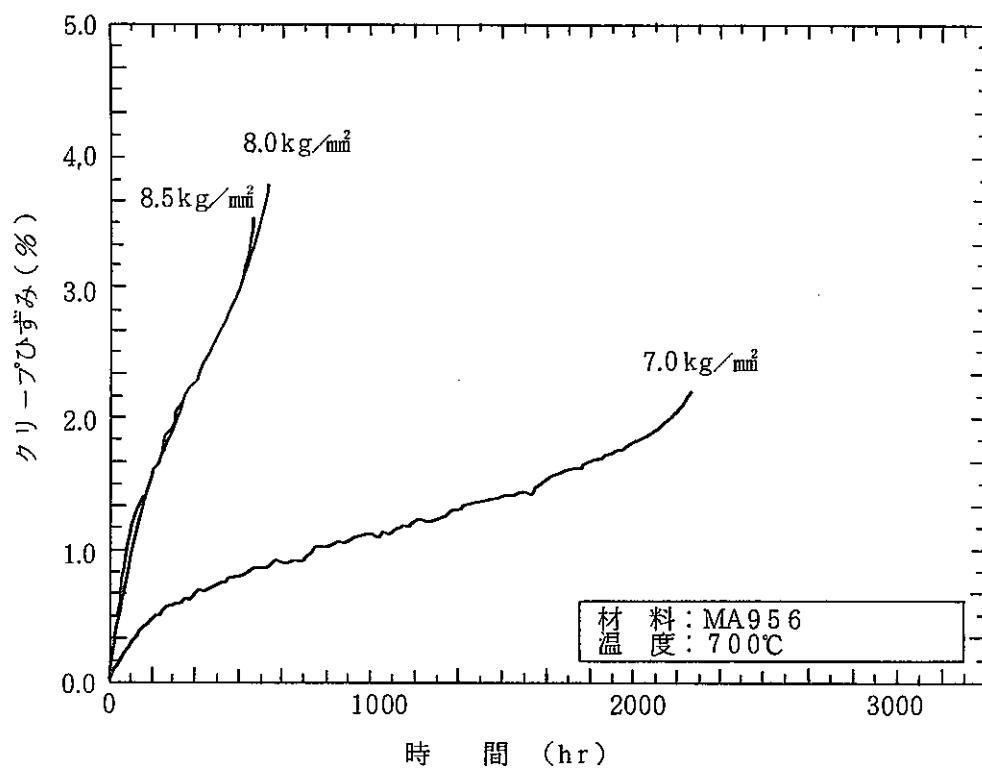


Fig.18 MA 956 の 700°C におけるクリープ曲線

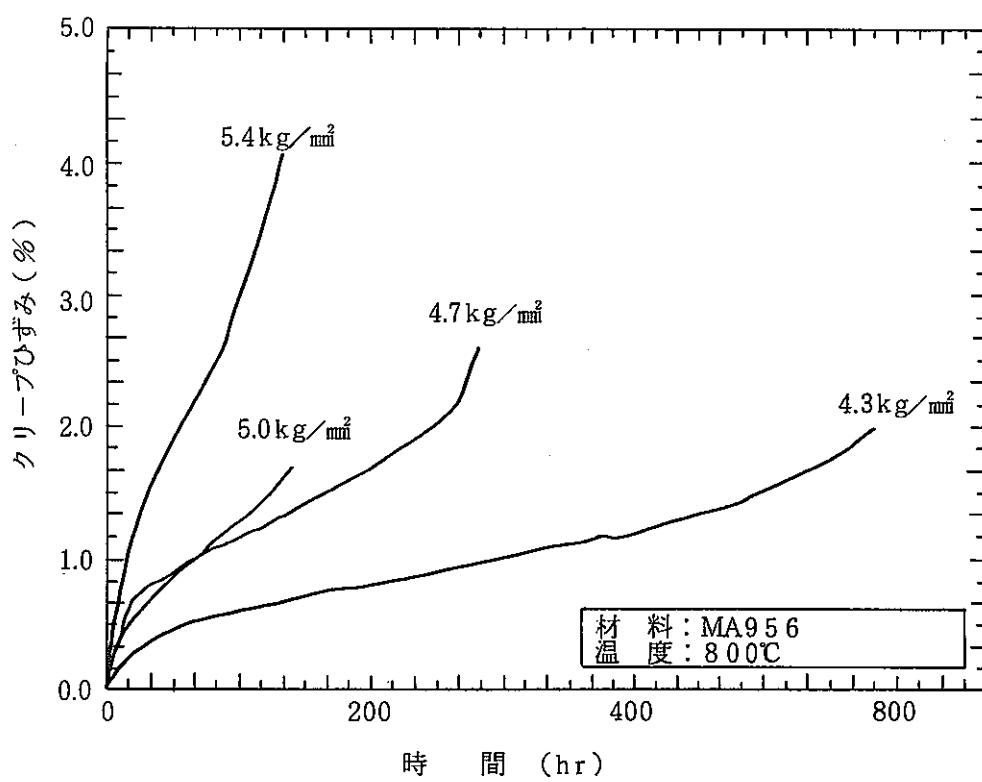


Fig.19 MA 956 の 800°C におけるクリープ曲線

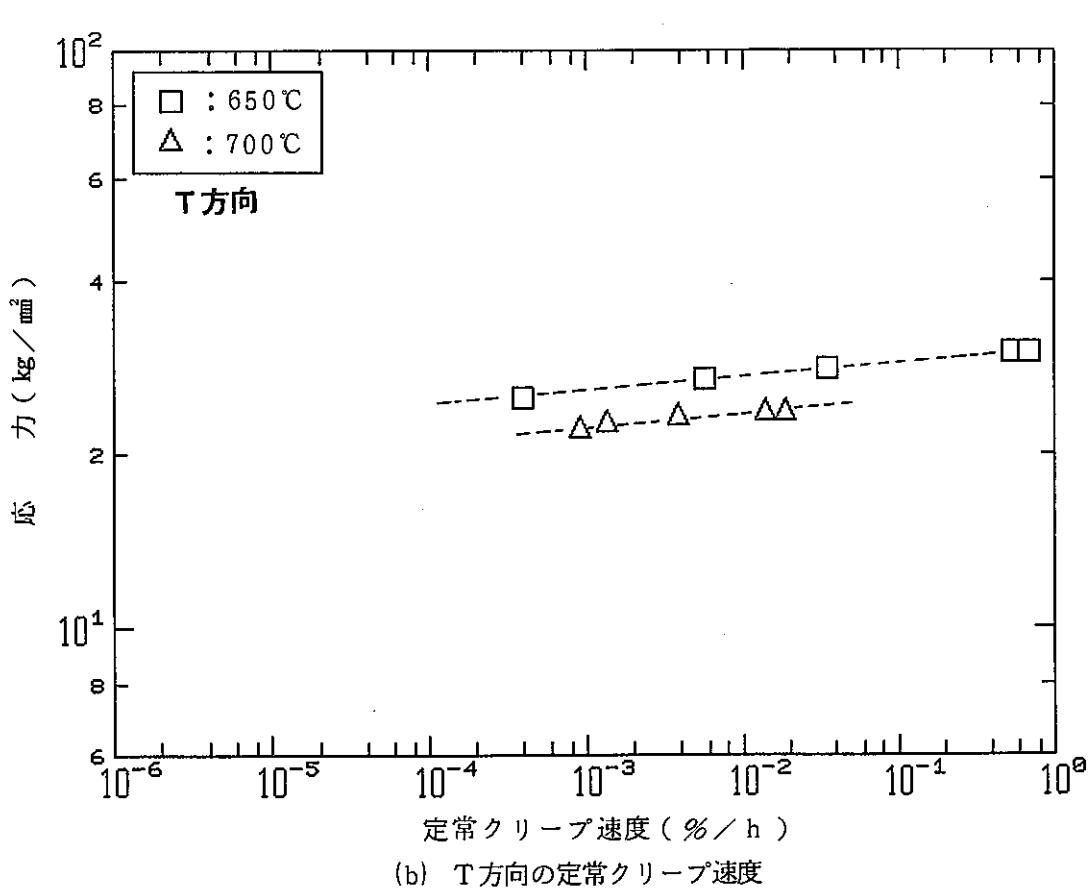
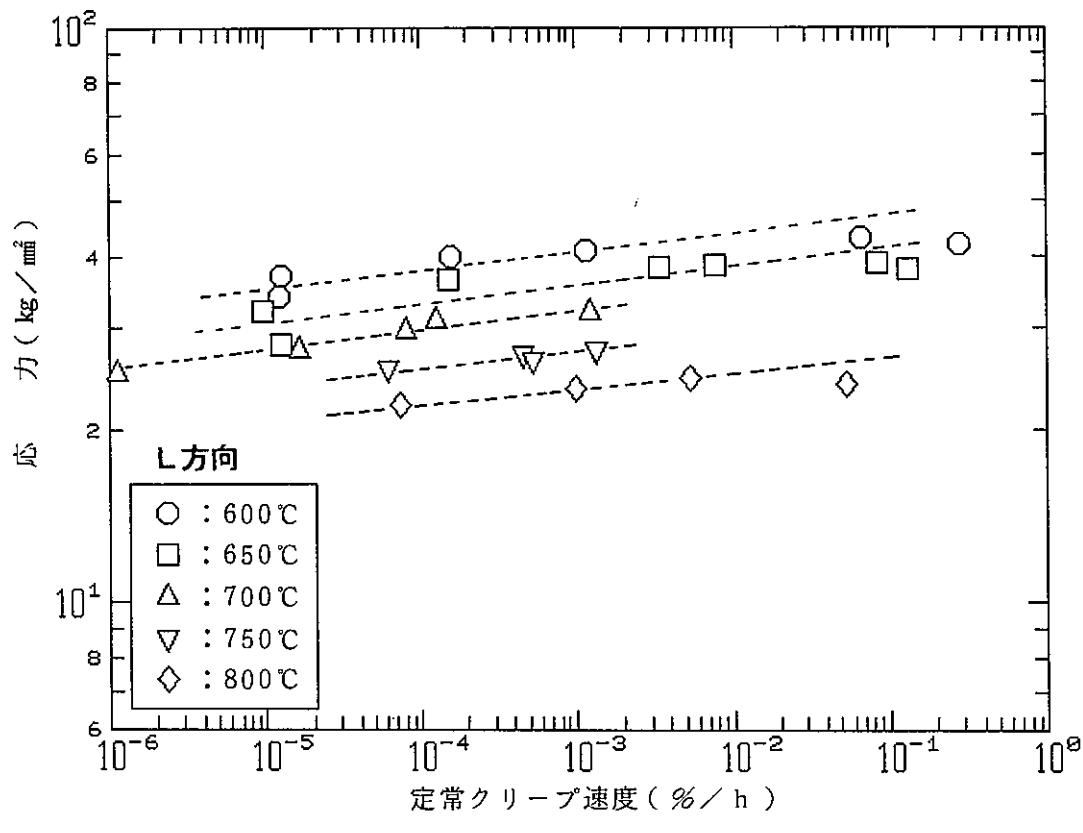


Fig.20 MA957 の定常クリープ速度

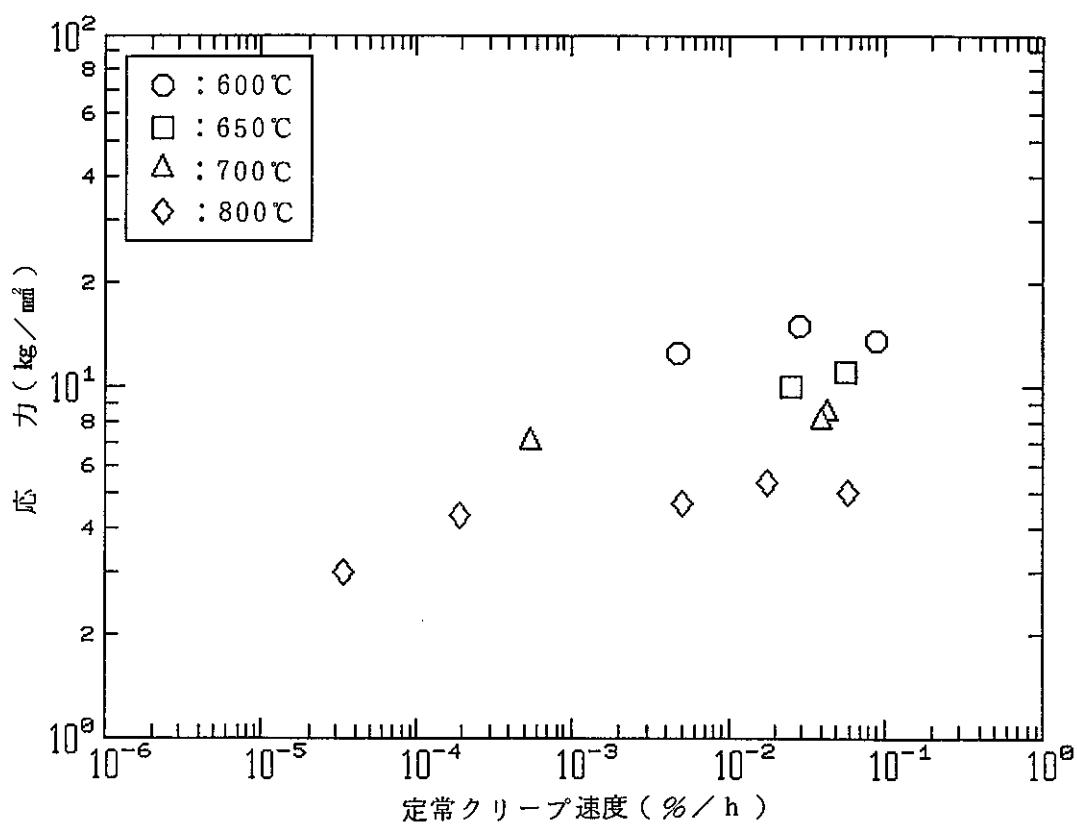


Fig. 21 MA 95 6 の定常クリープ速度(L 方向)

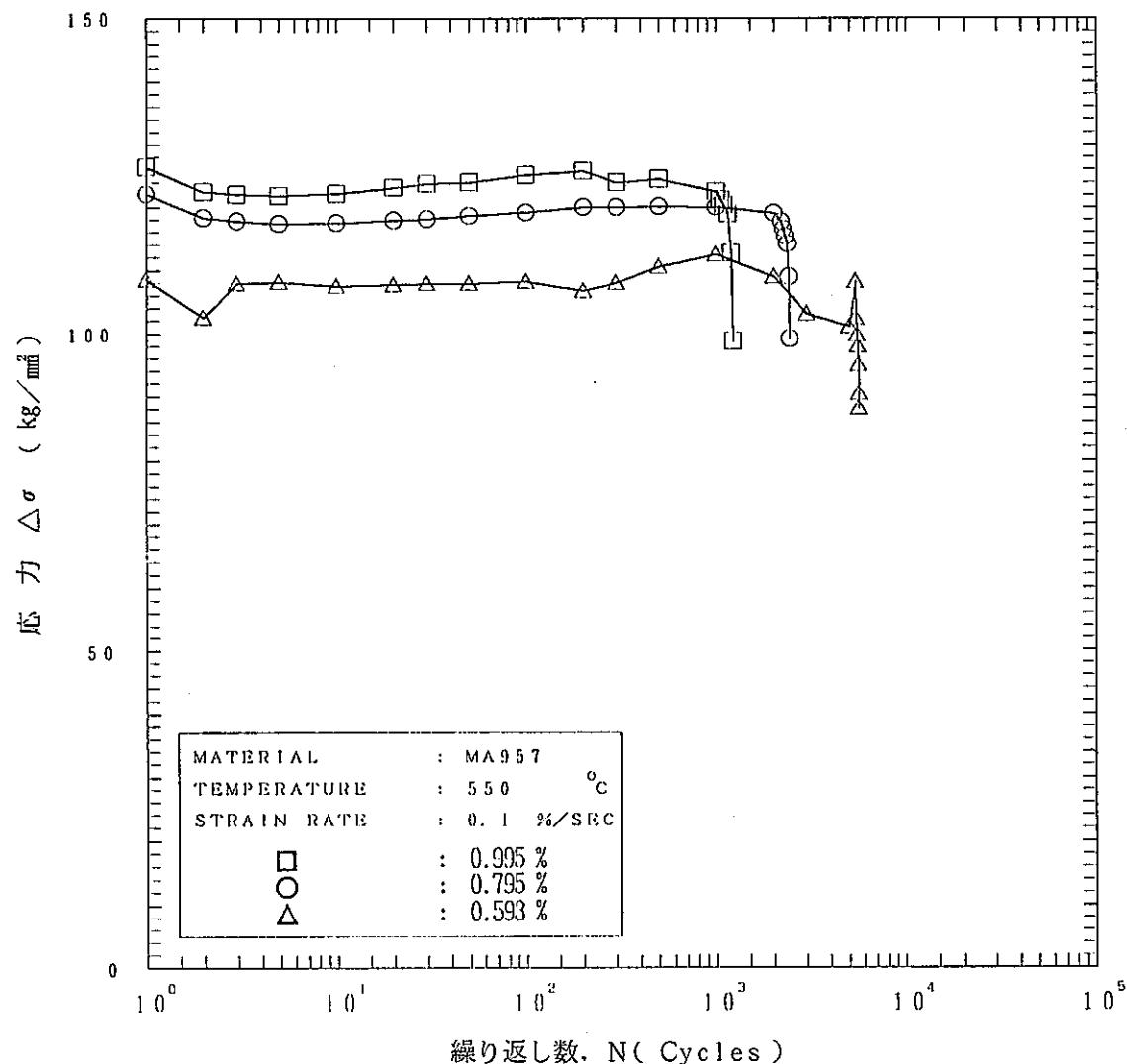


Fig.22 550°CにおけるMA957の繰返しに伴う応力変化

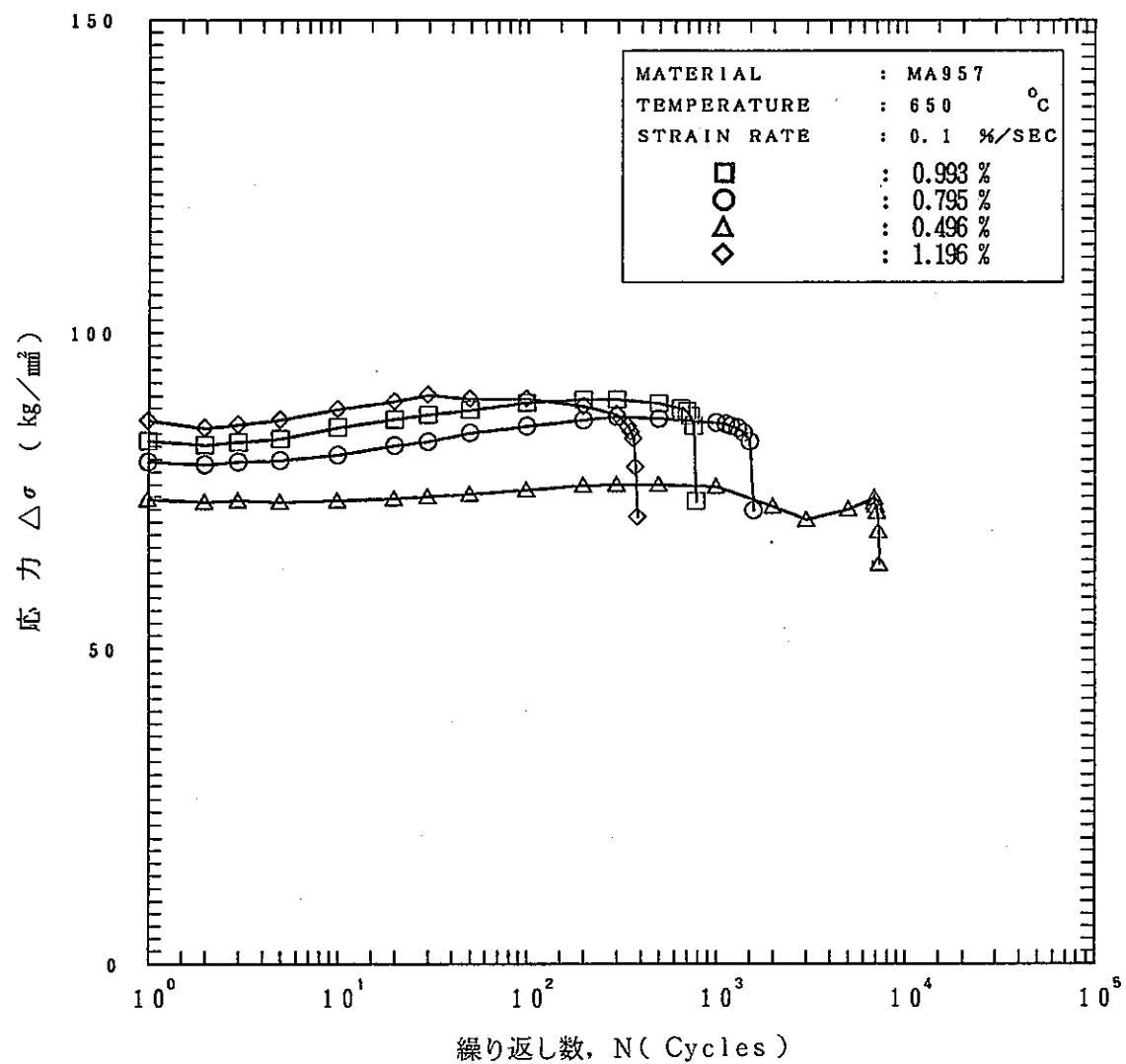


Fig.23 650°CにおけるMA957の繰返しに伴う応力変化

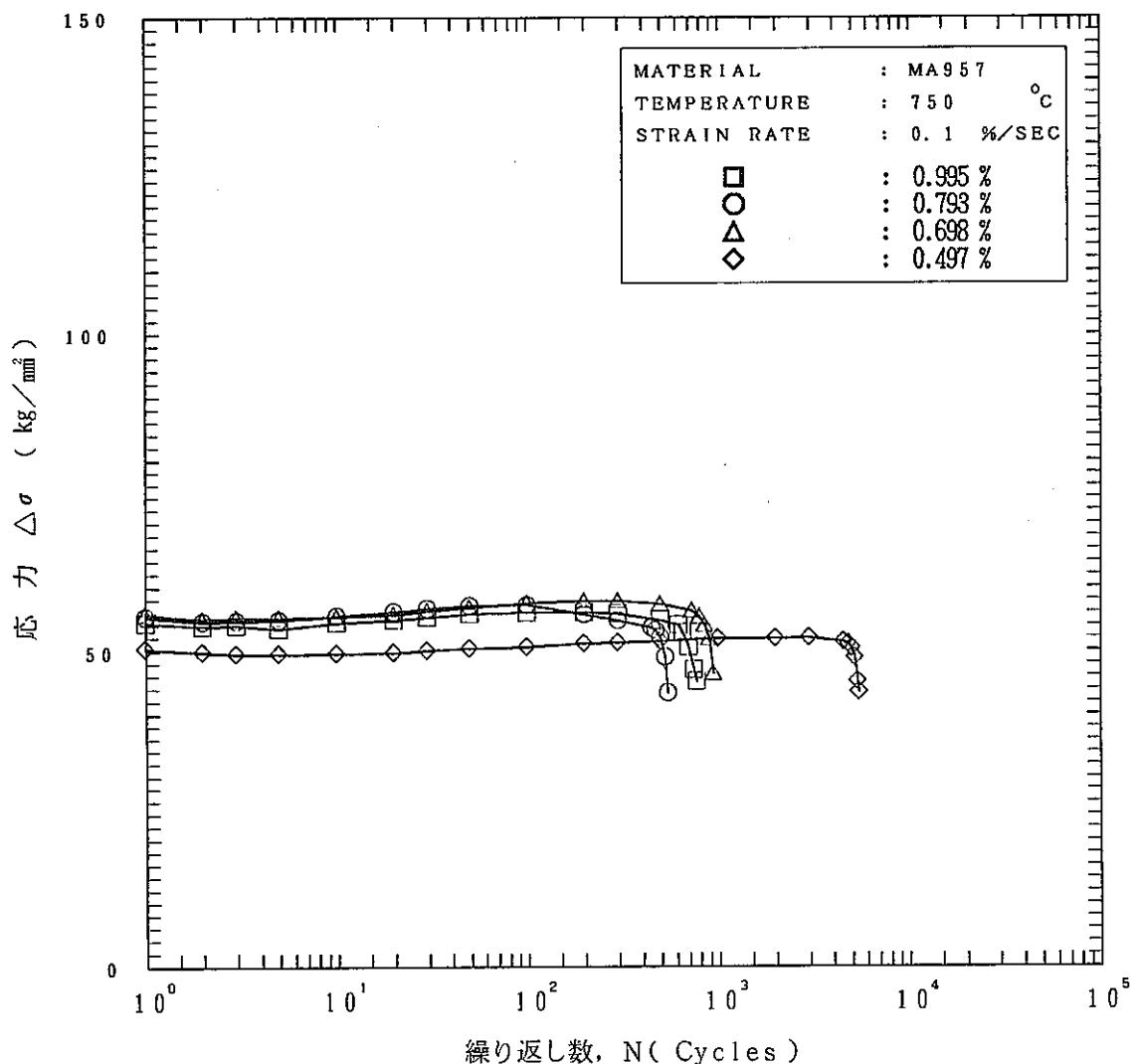


Fig.24 750°CにおけるMA957の繰返しに伴う応力変化

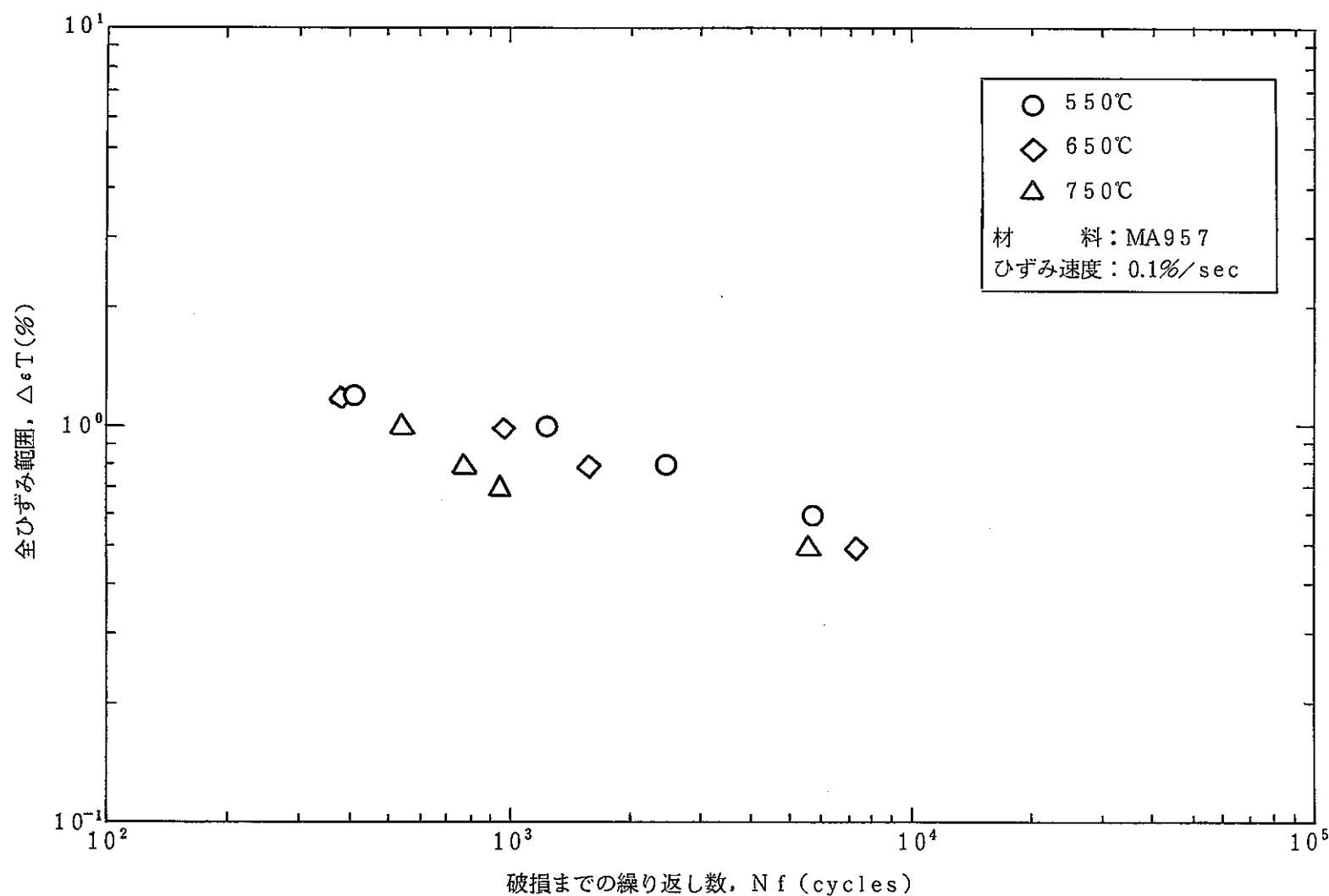


Fig. 25 酸化物分散強化型フェライト鋼MA 957の大気中低サイクル疲労特性

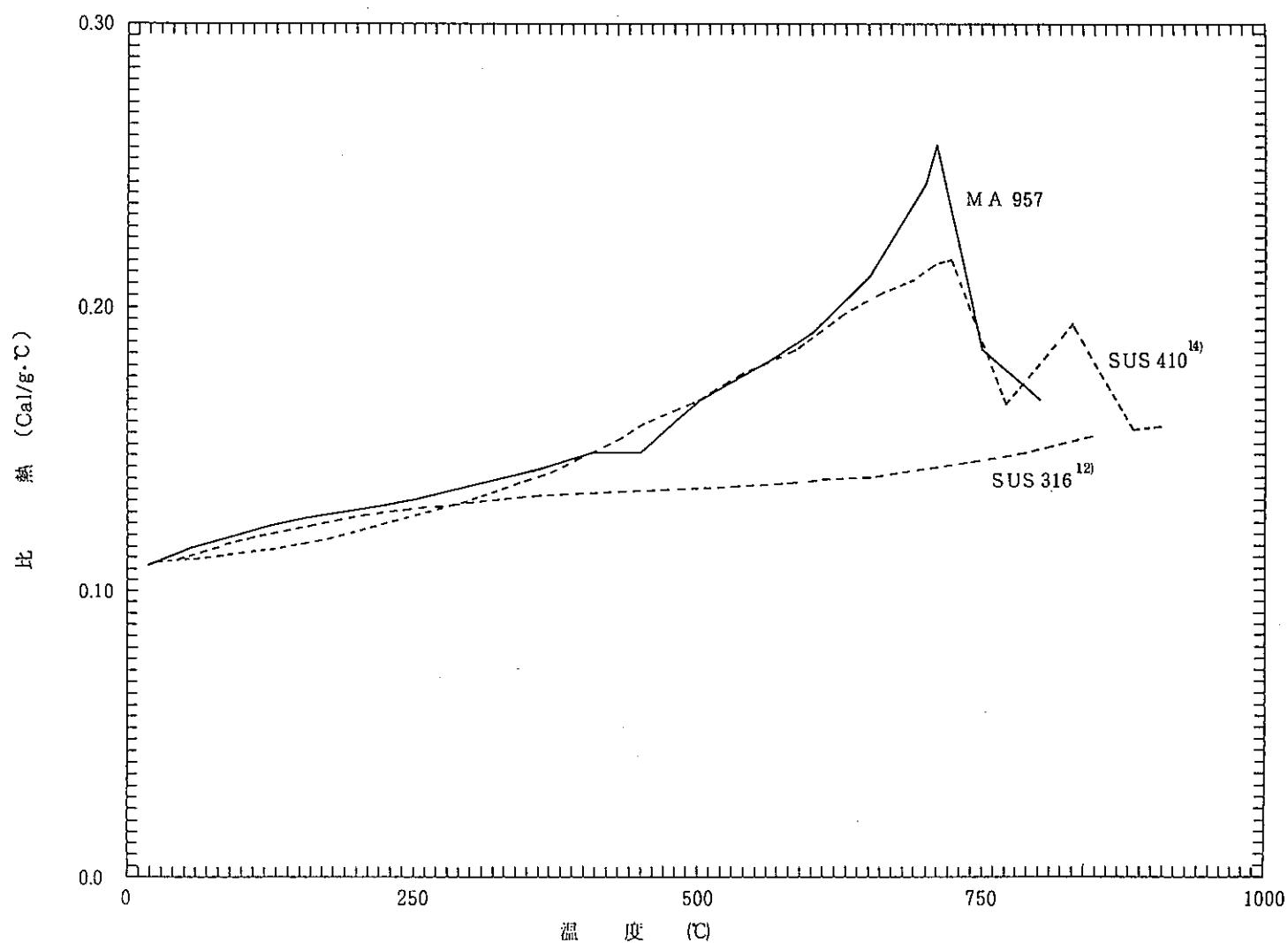


Fig.26 MA957とSUS316, SUS410 フェライト鋼との比熱の比較

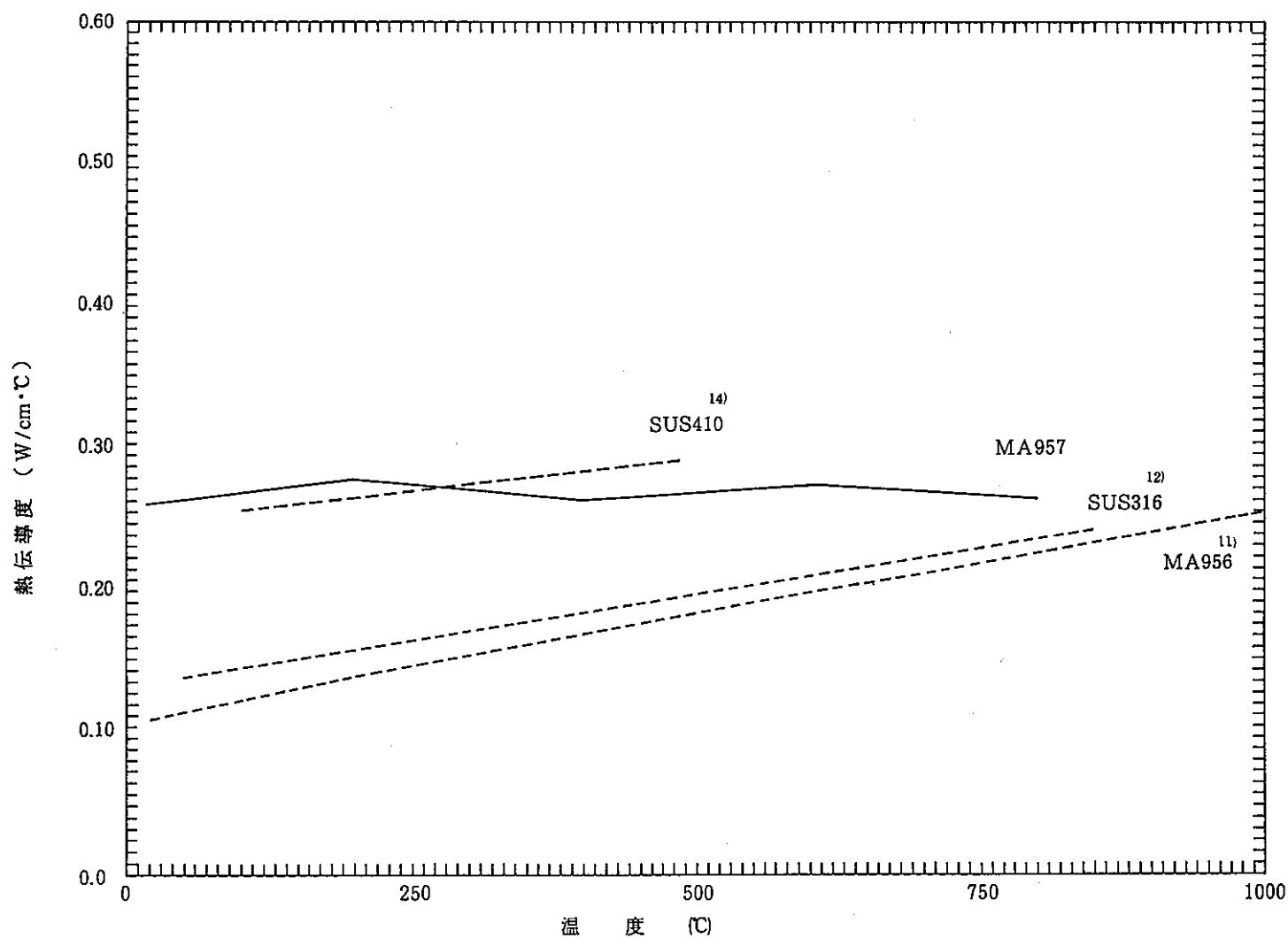


Fig.27 MA957とSUS316, SUS410 フェライト鋼との熱伝導度の比較

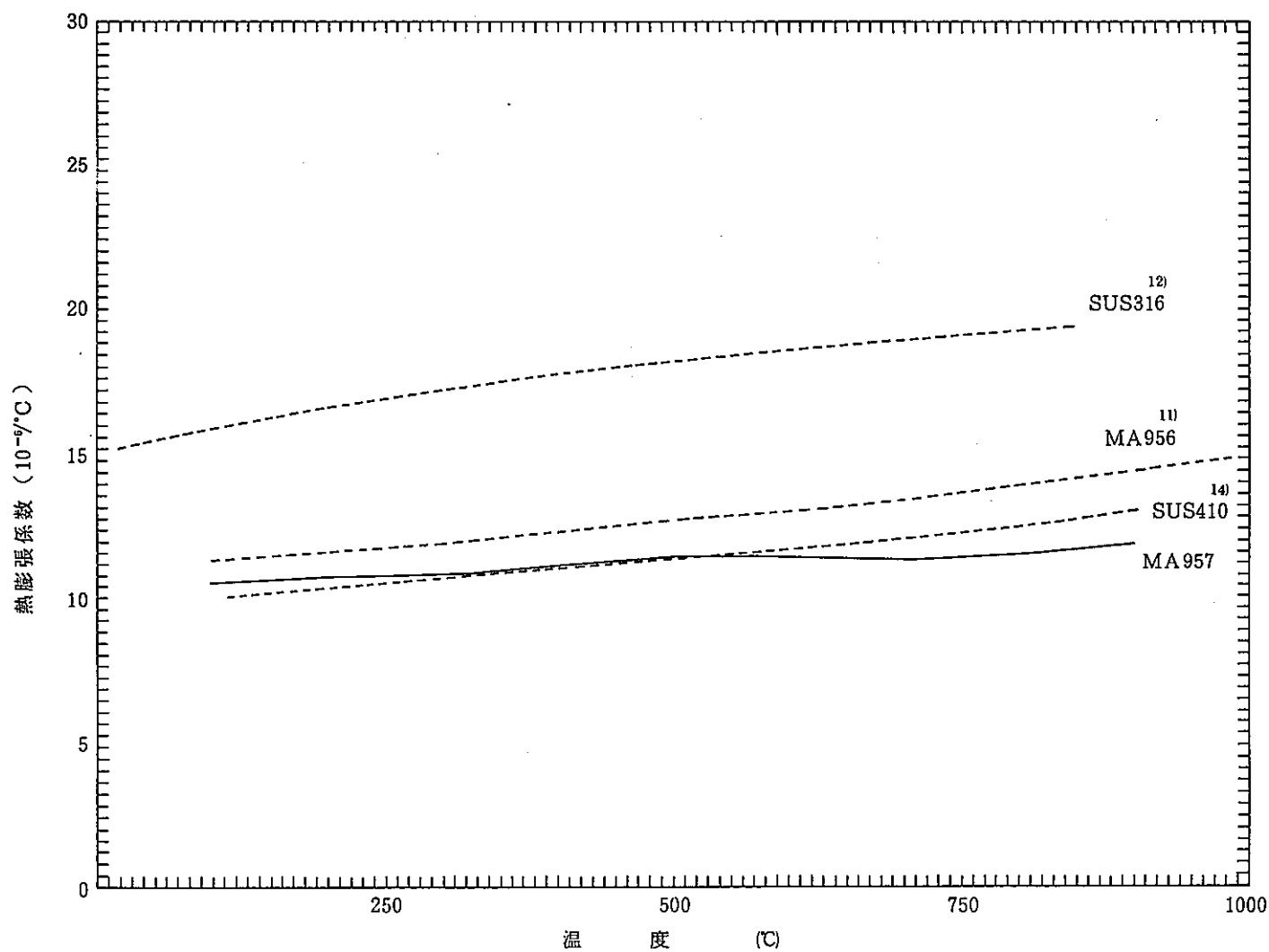


Fig.28 MA957, MA956とSUS316, SUS410 フェライト鋼との熱膨張係数の比較

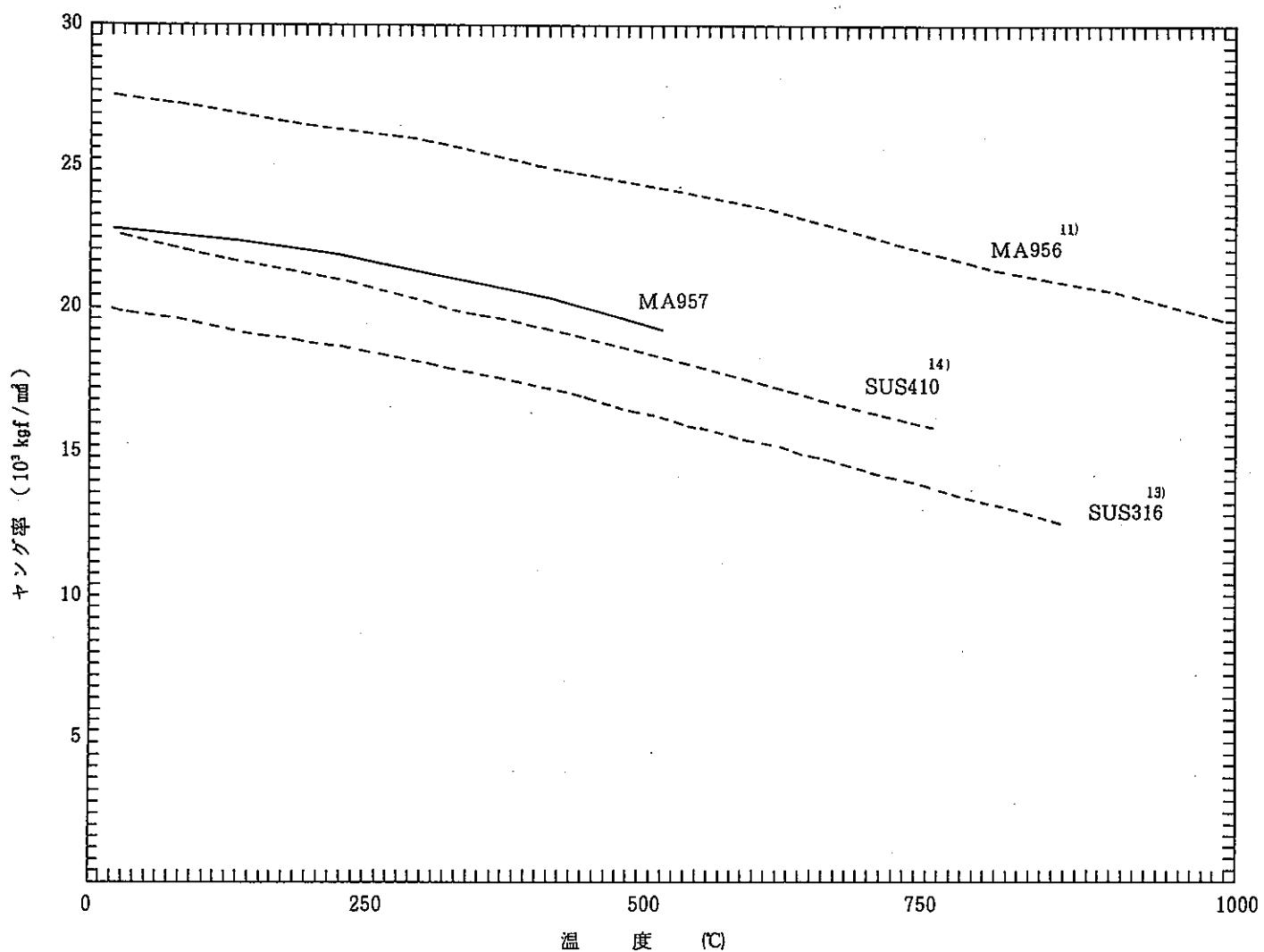


Fig.29 MA957, MA956 と SUS316, SUS410 フェライト鋼とのヤング率の比較

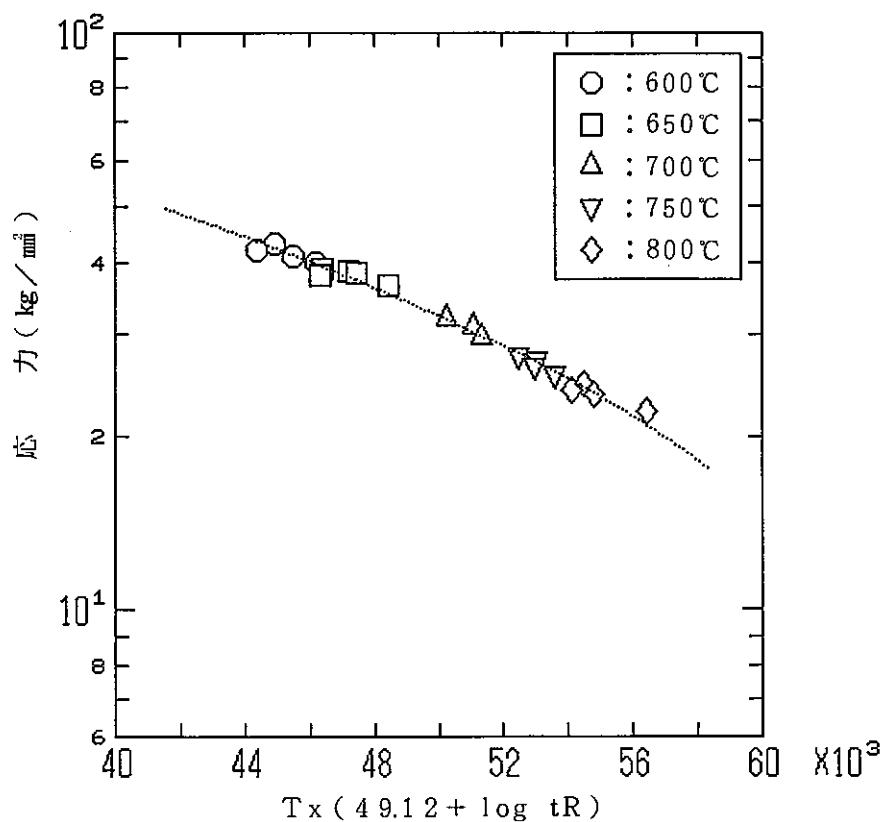


Fig. 30 Larson-Millerパラメータ法によるクリープ破断強さの整理 (MA957 L方向)

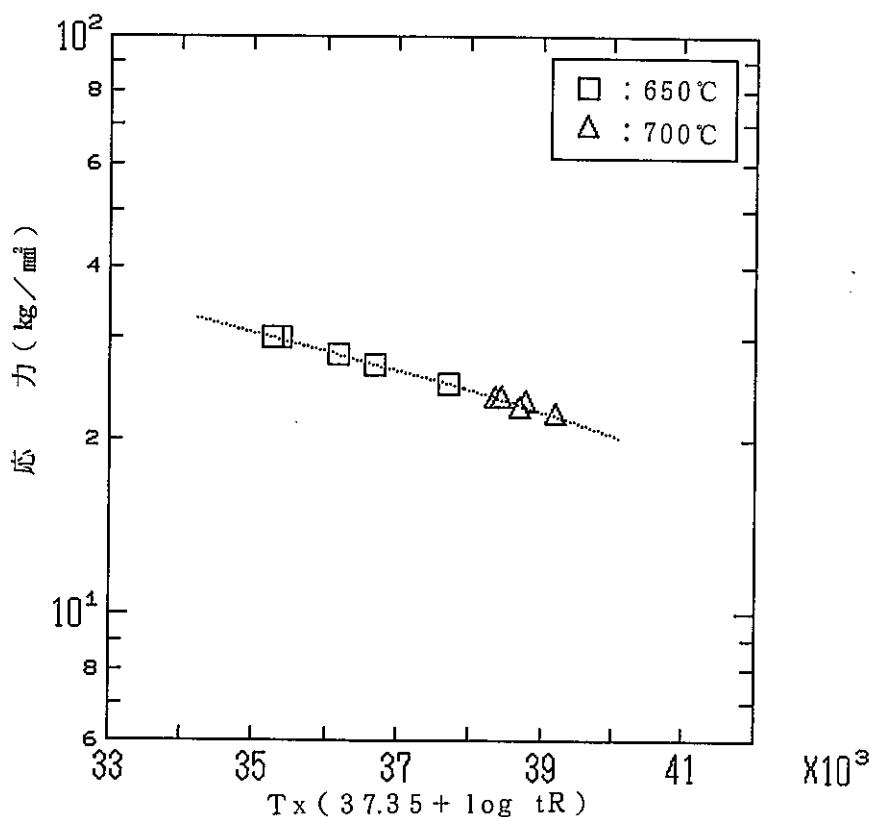


Fig. 31 Larson-Millerパラメータ法によりクリープ破断強さの整理 (MA957 T方向)

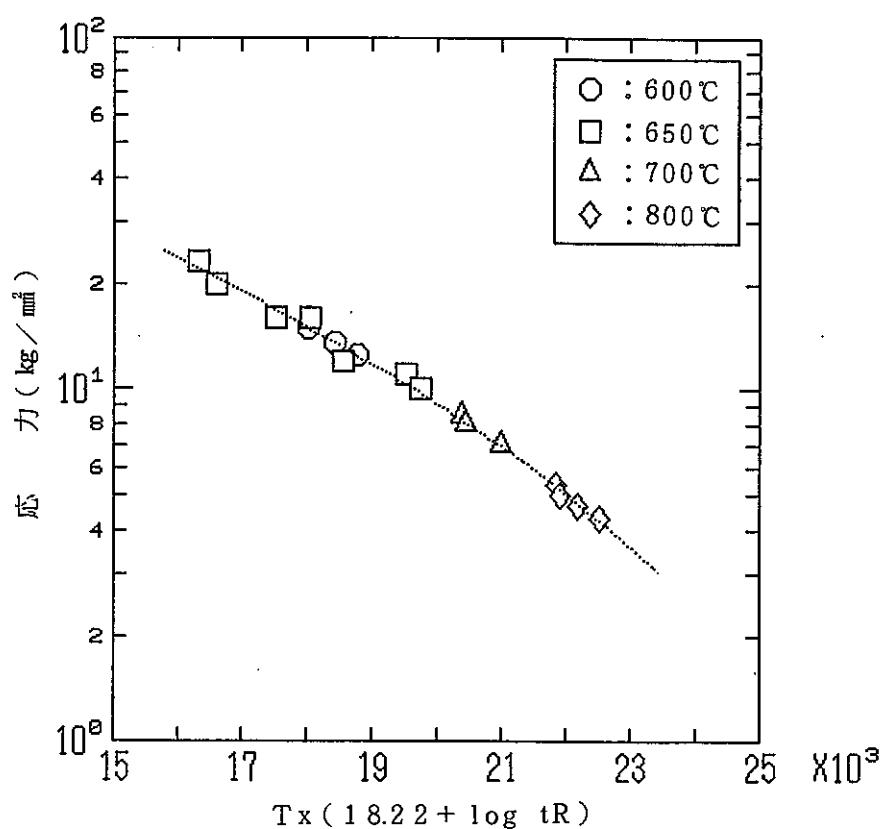


Fig.32 Larson-Millerパラメータ法によるクリープ破断強さの整理(MA956 L方向)

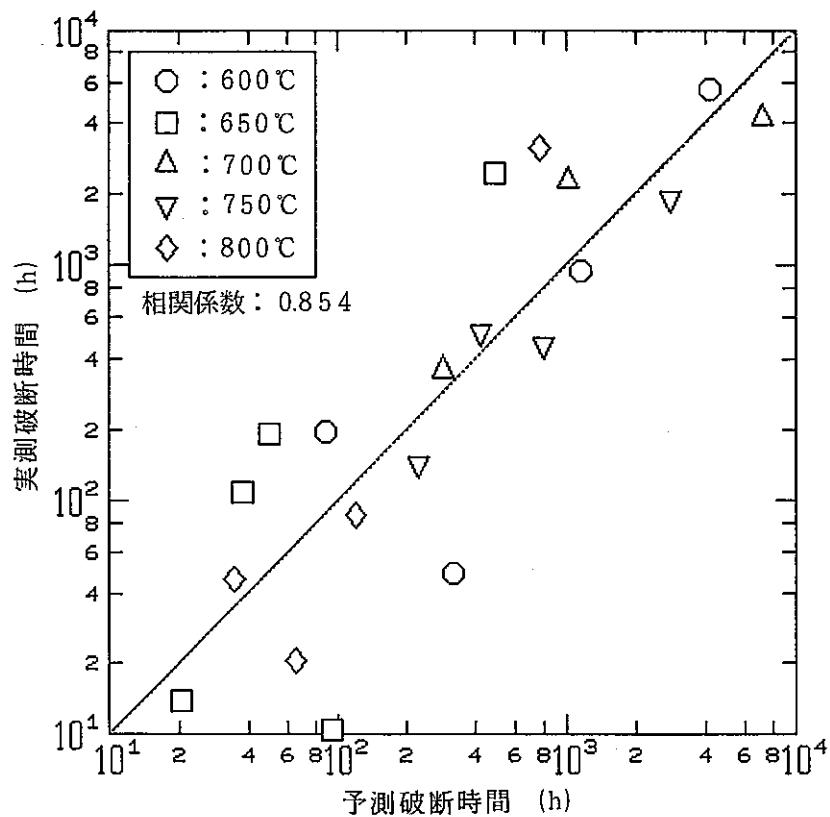


Fig.33 クリープ破断時間の予測値と実測値との関係
(MA957 L方向)

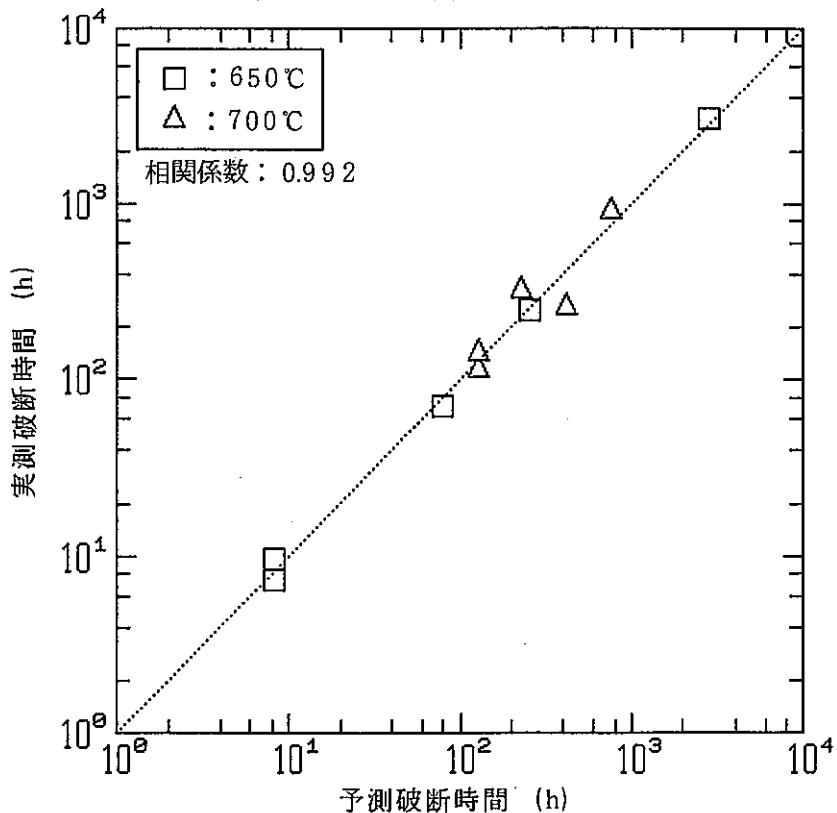
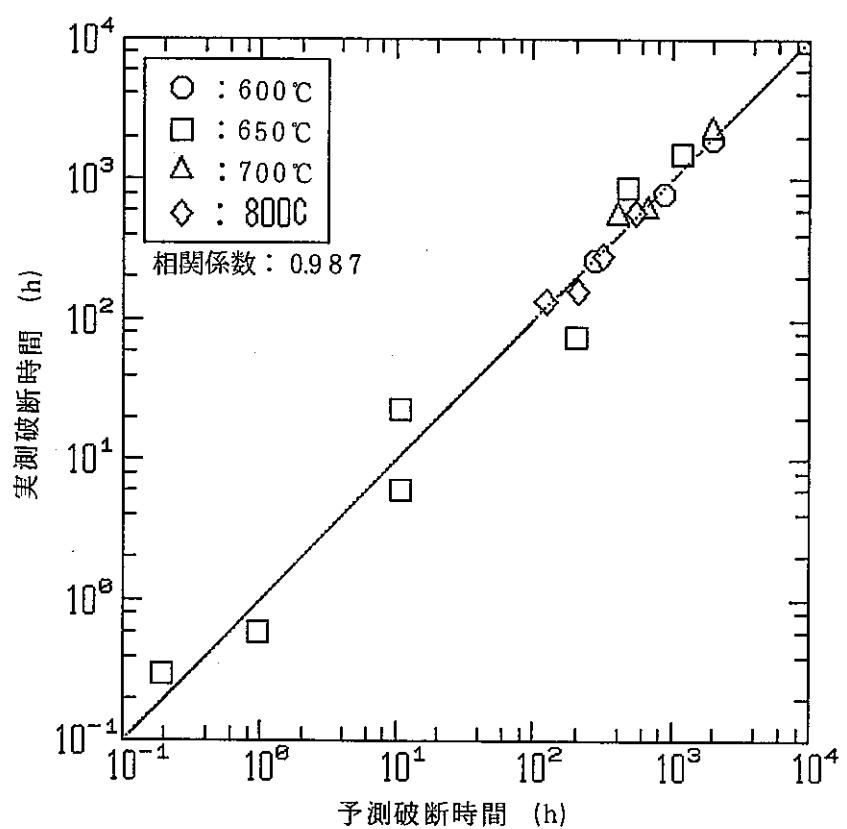


Fig.34 クリープ破断時間の予測値と実測値との関係
(MA957 T方向)



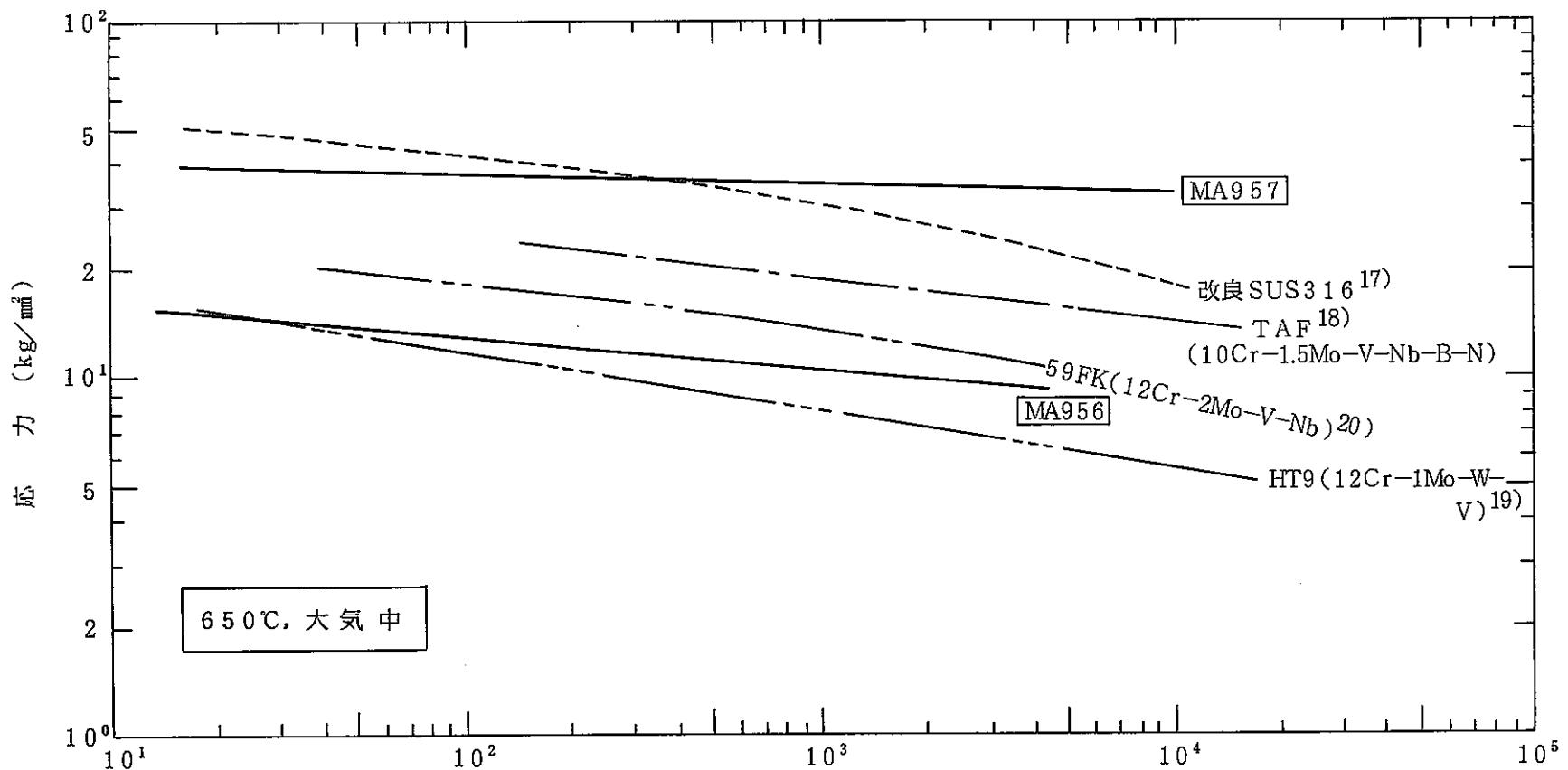


Fig.36 MA957, MA956 と改良SUS316, 炭化物析出強化型フェライト鋼の 650°C クリープ破断強度の比較

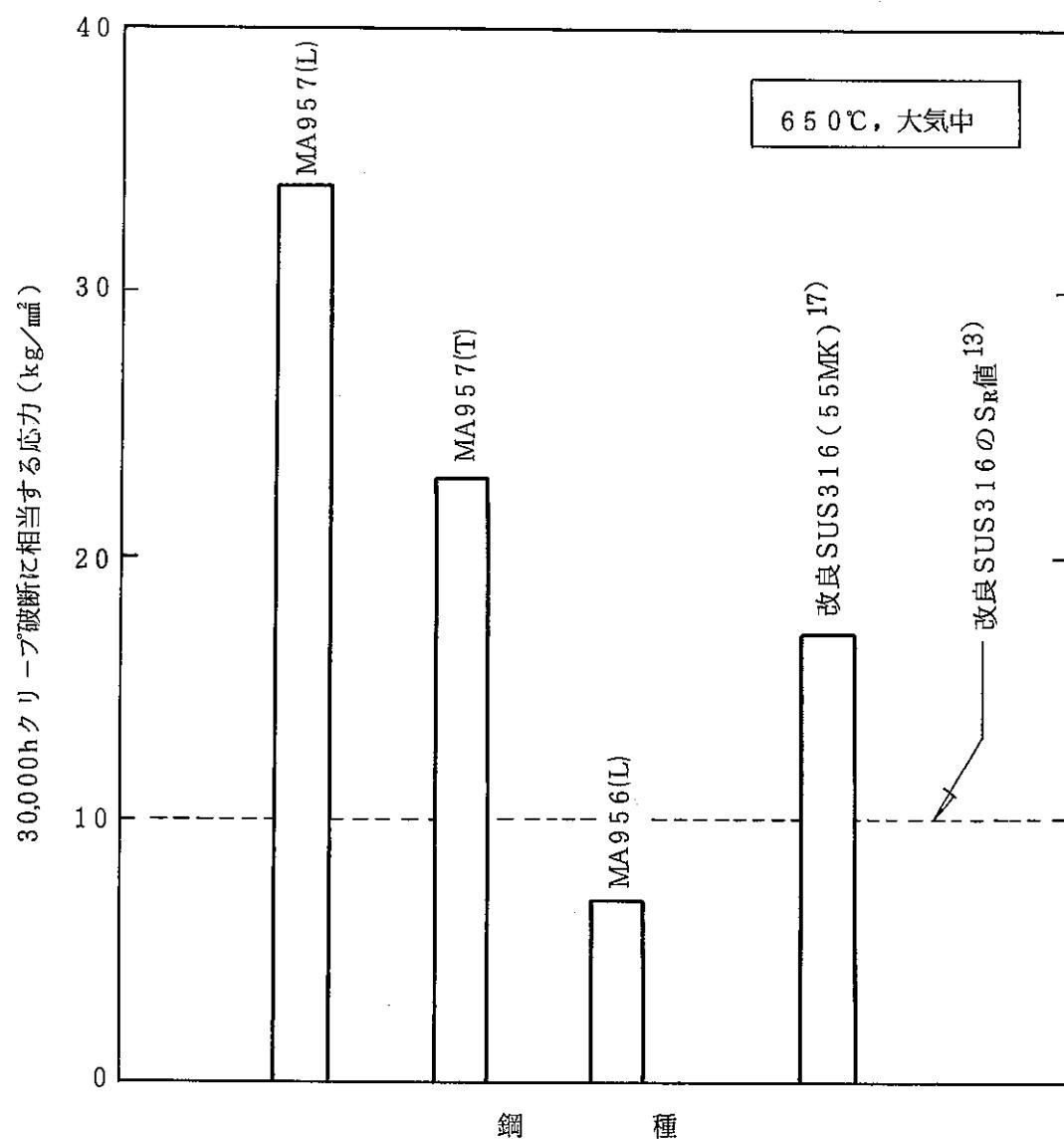


Fig.37 長時間クリープ破断応力の比較
(LMPからの外挿応力)

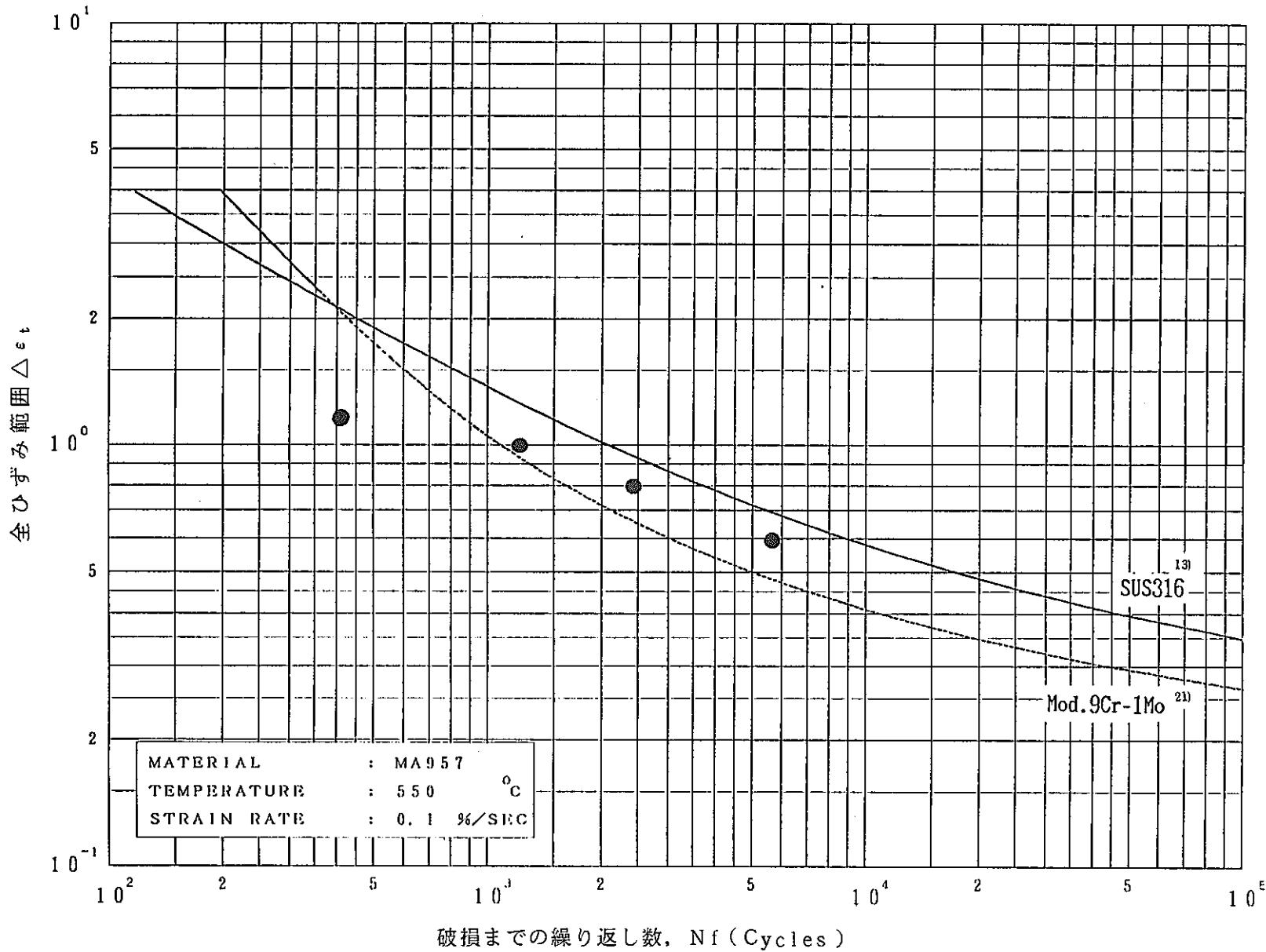


Fig.38 550°Cにおける低サイクル疲労寿命の比較

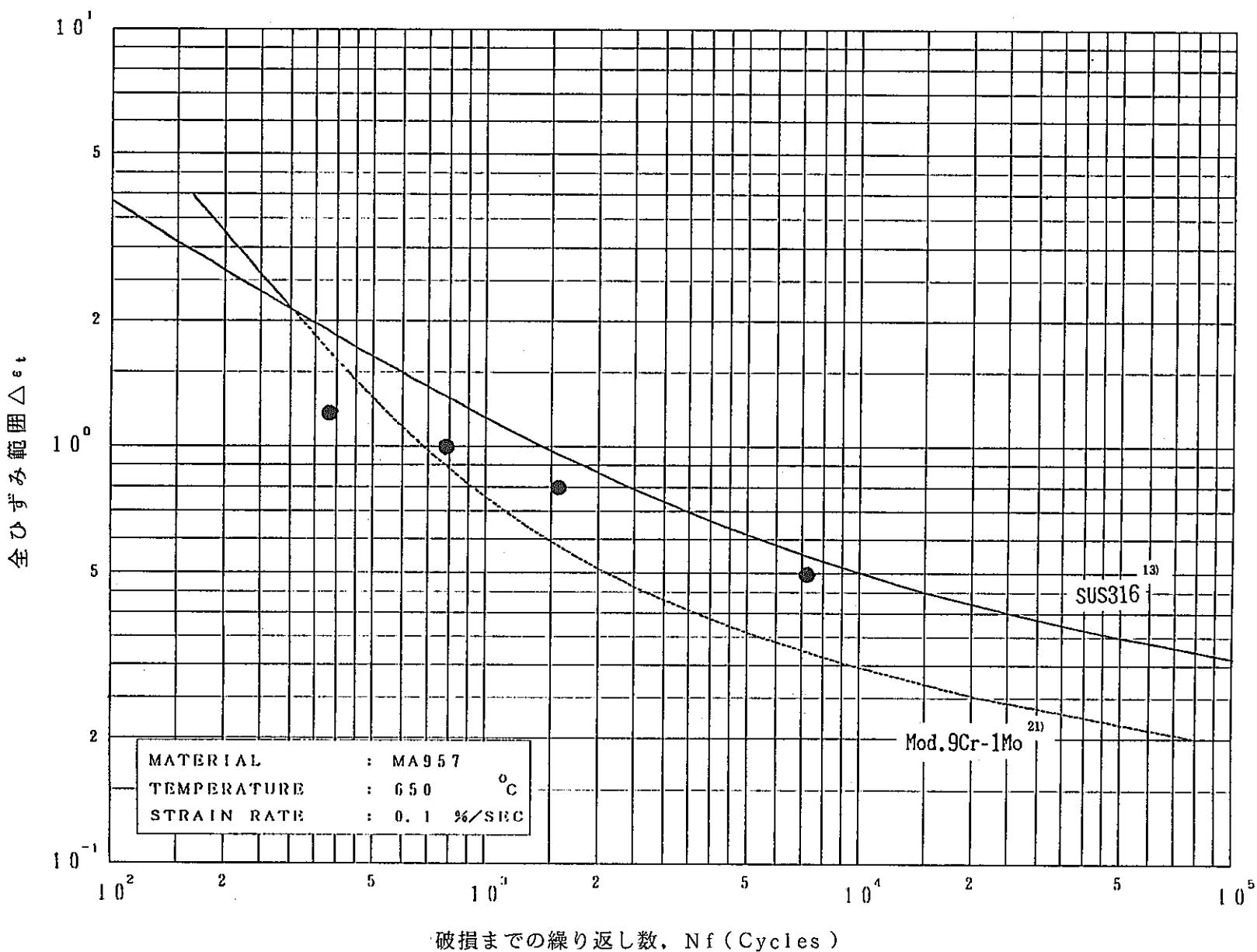


Fig.39 650°Cにおける低サイクル疲労寿命の比較

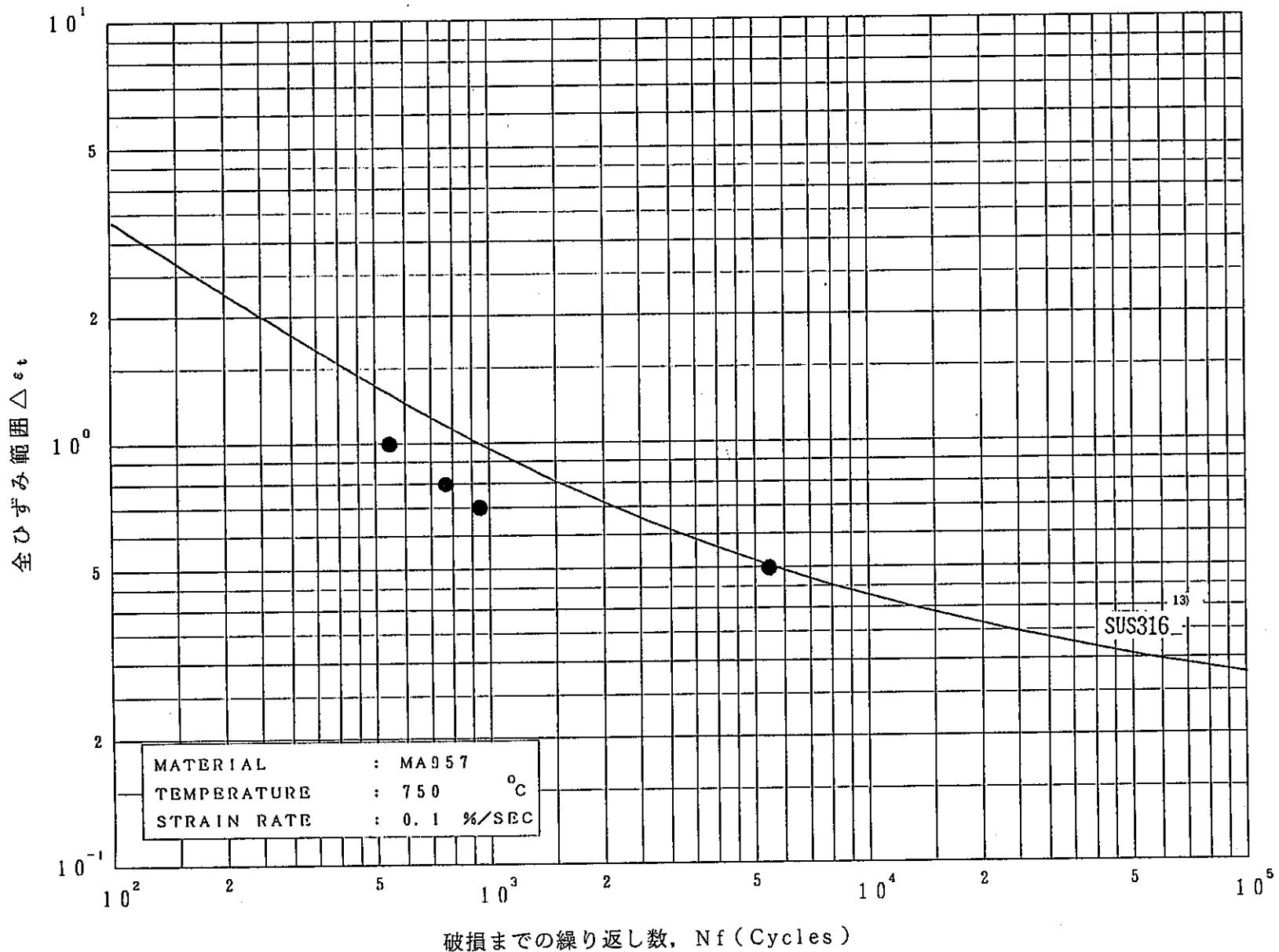


Fig.40 750°Cにおける低サイクル疲労寿命の比較



a

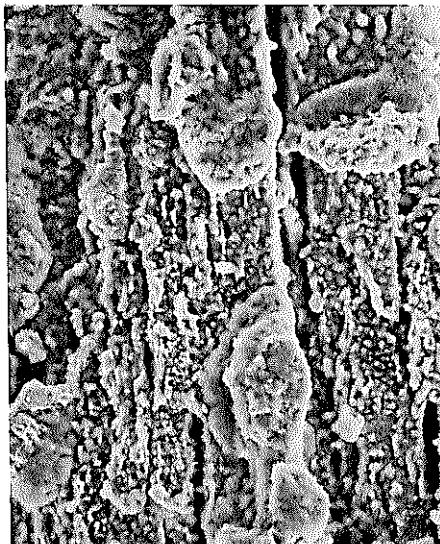
A部



Photo.1 650°C, 2445hクリープ
破断材の破面観察 (MA957)



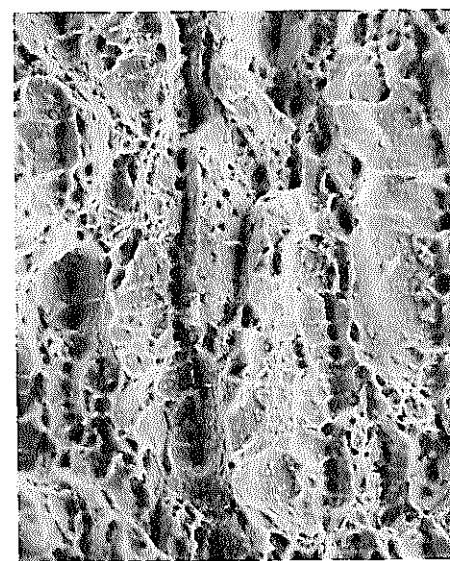
A部拡大 0.2 mm



$20\text{ }\mu\text{m}$
a部の破面形態



$5\text{ }\mu\text{m}$



$20\text{ }\mu\text{m}$
b部の破面形態

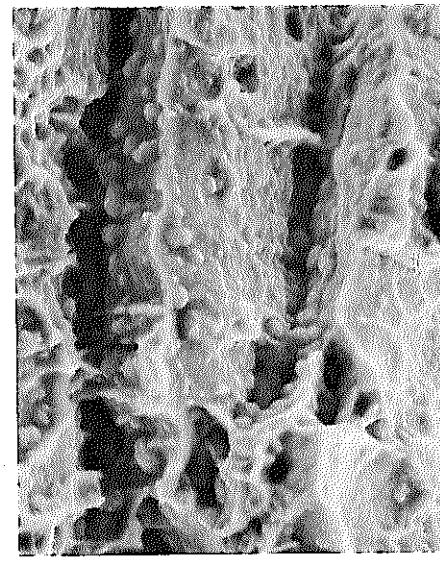
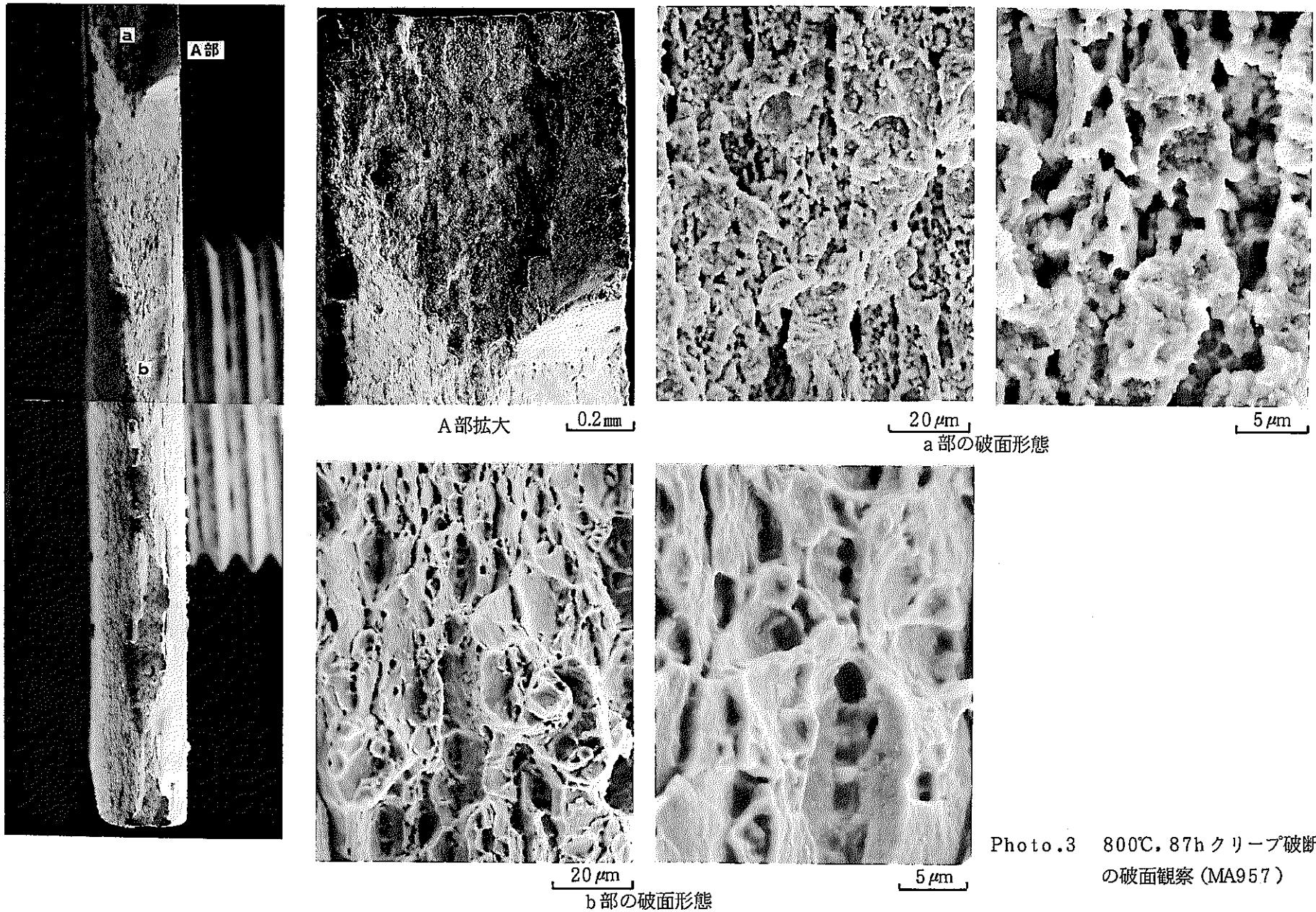


Photo.2 $700^{\circ}\text{C}, 4268\text{h}$ クリープ
破断材の破面観察 (MA957)



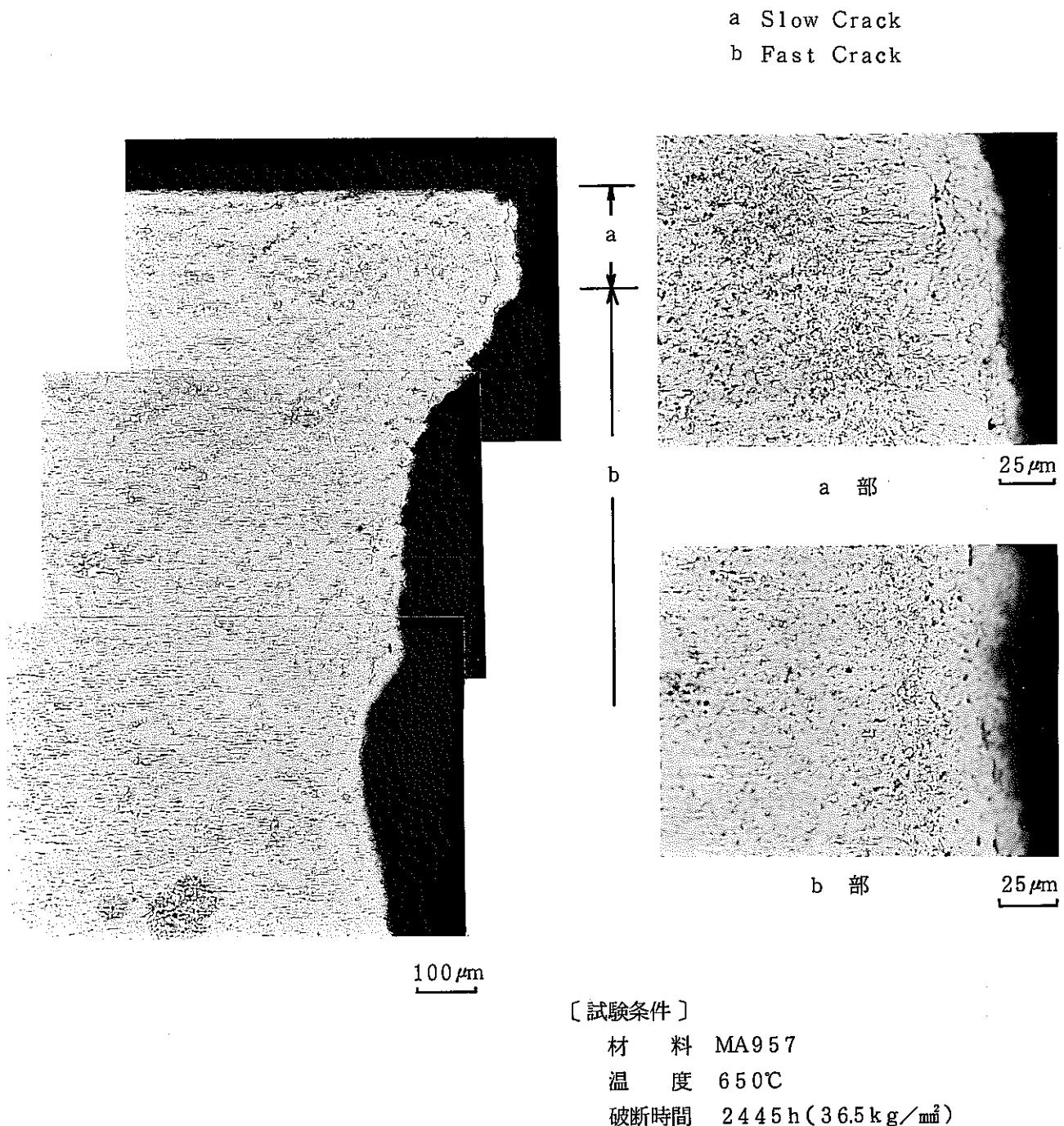
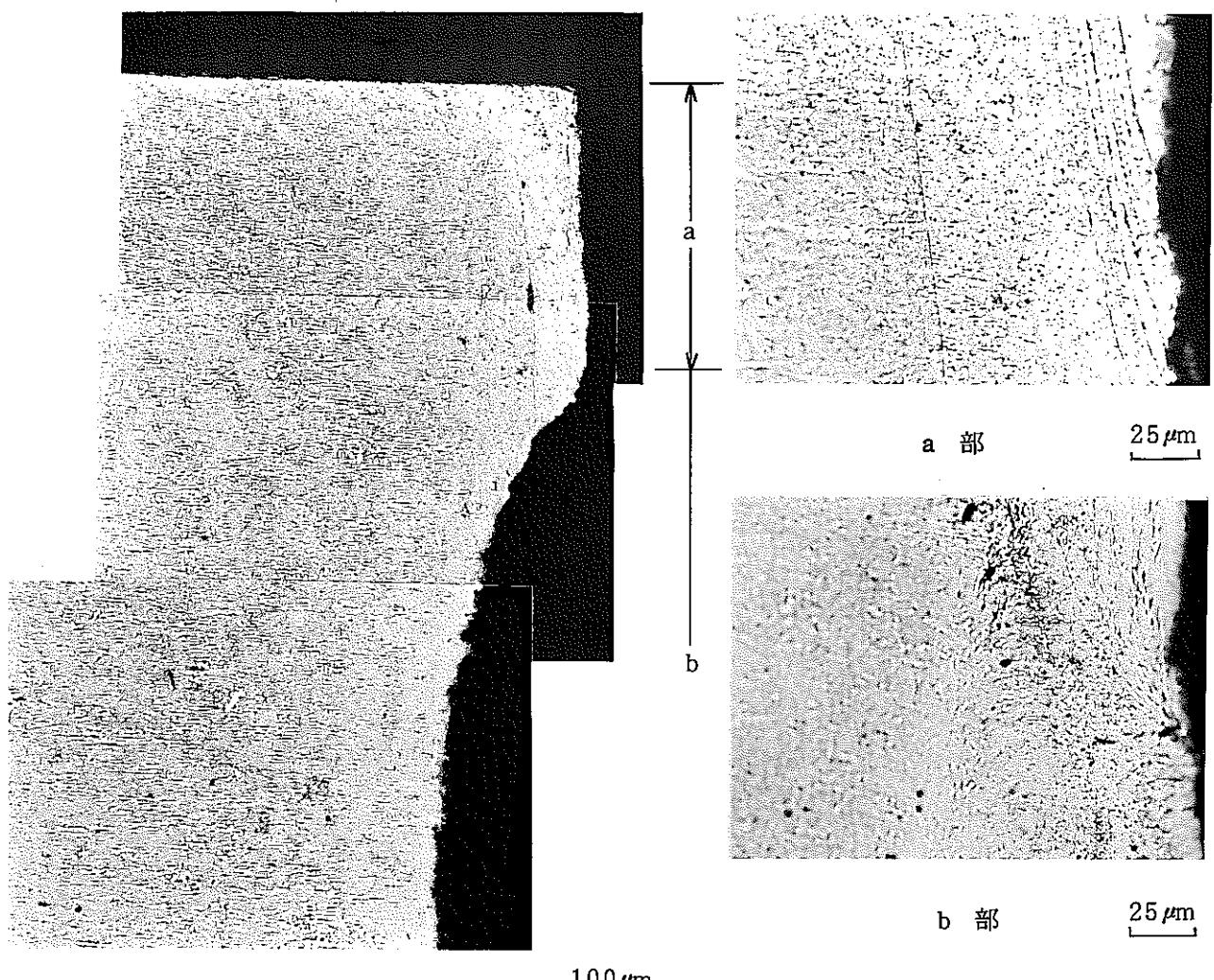


Photo.4 酸化物分散強化型フェライト鋼MA957の650°Cにおける
クリープ破断近傍部の組織(圧延方向面)

a : slow クラック部分
b : fast クラック部分



[試験条件]

材 料 MA 957

温 度 700°C

破断時間 4,268 h (2.95 kg/mm²)

Photo.5 酸化物分散強化型フェライト鋼MA 957の700°Cにおけるクリープ破断近傍部の組織(圧延方向面)

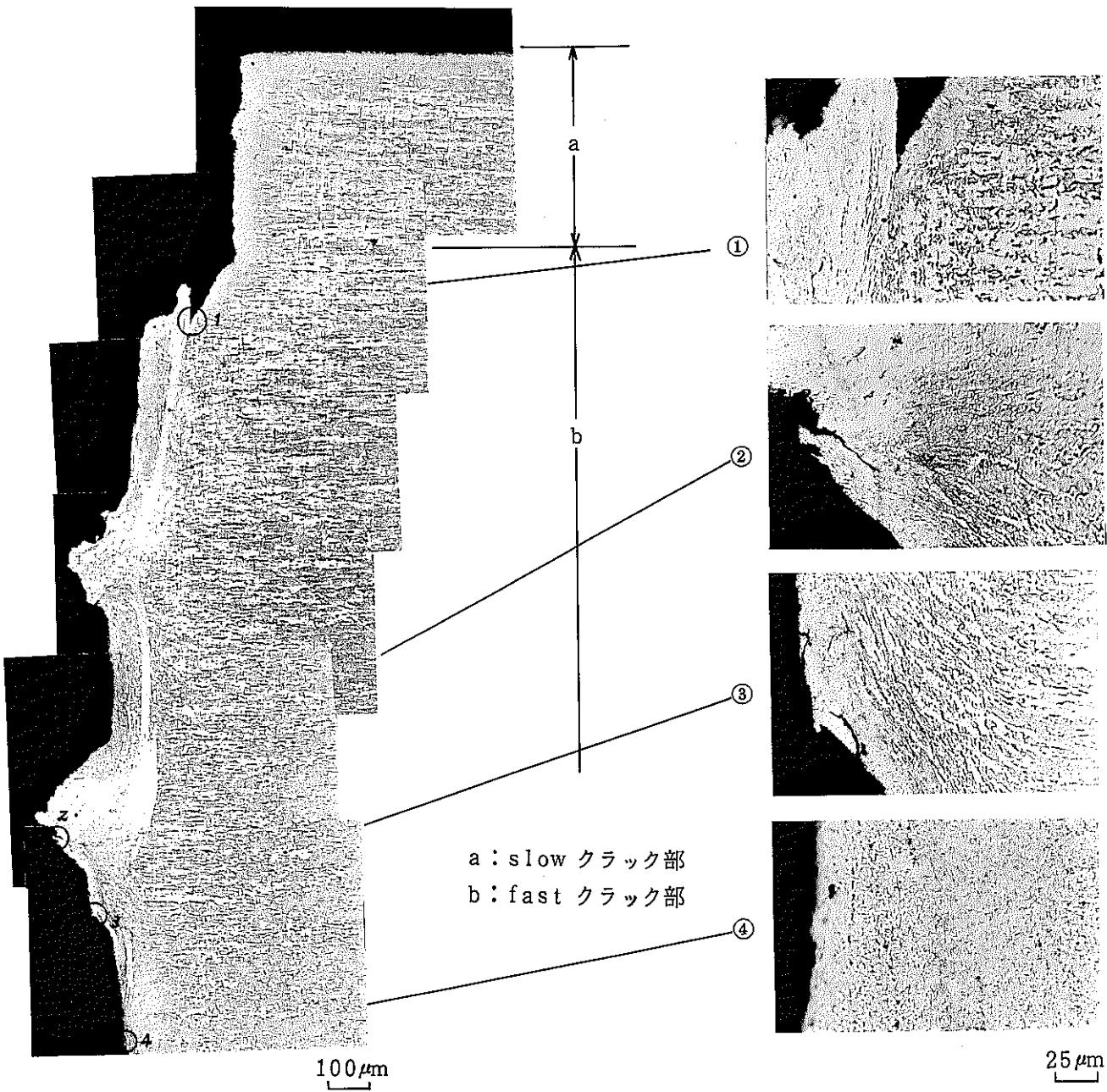
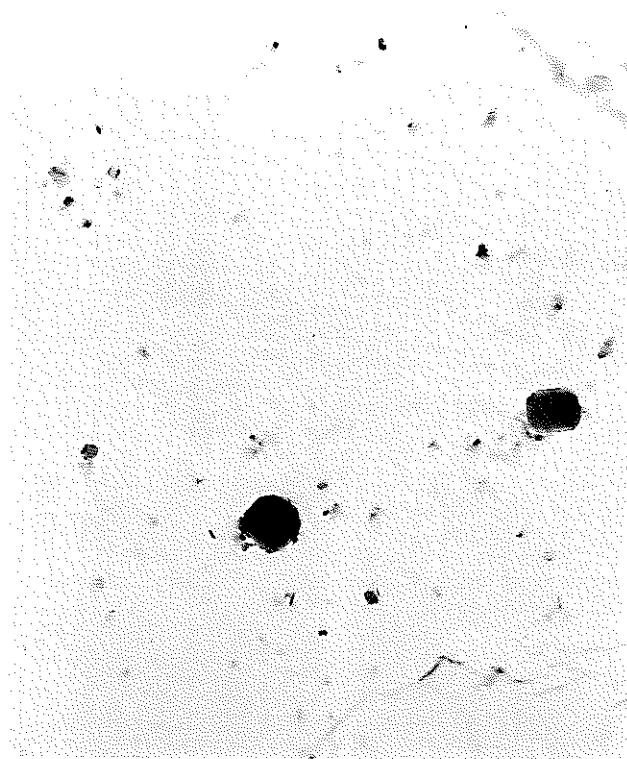
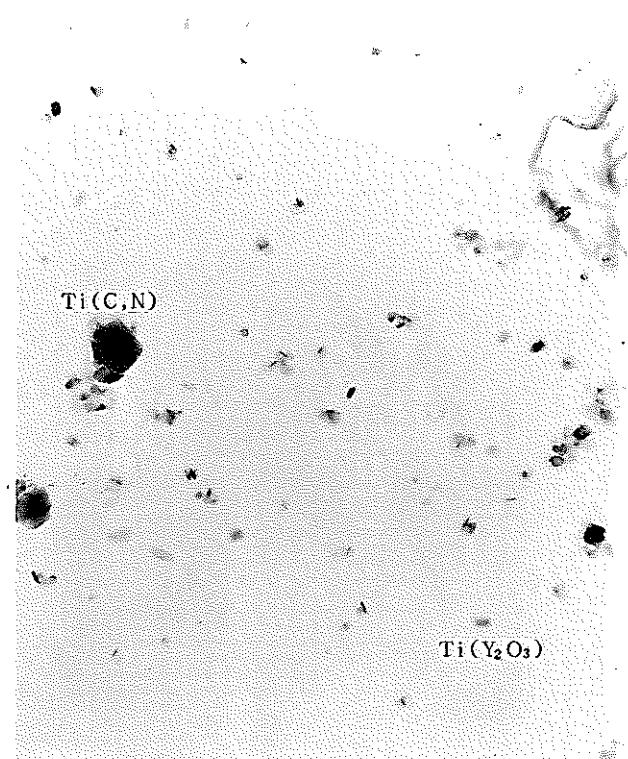


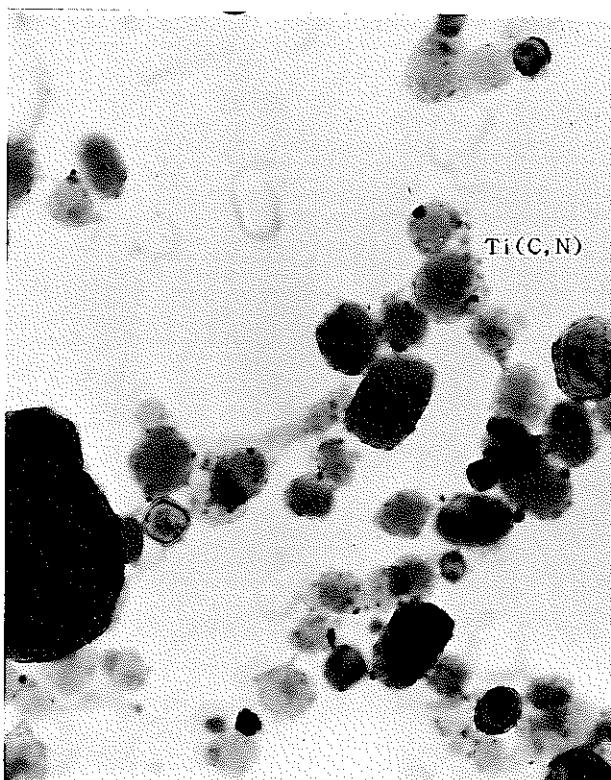
Photo.6 酸化物分散強化型フェライト鋼MA957の800°Cにおけるクリープ破断近傍部の組織



(a)



(b)



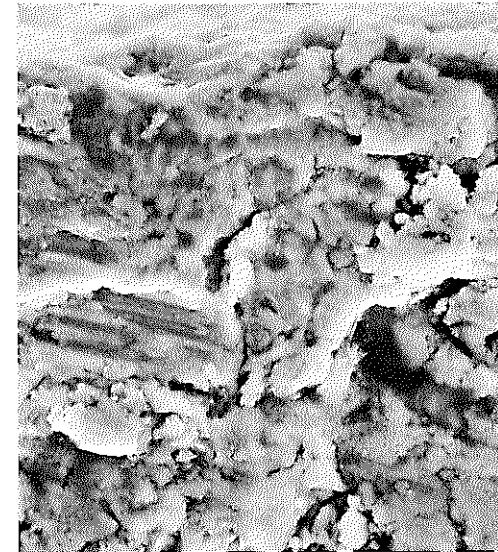
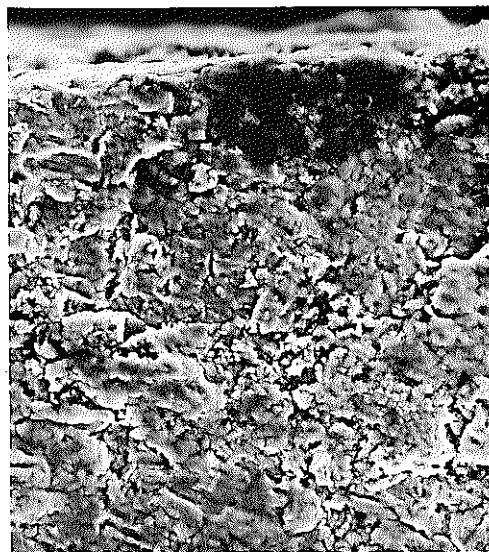
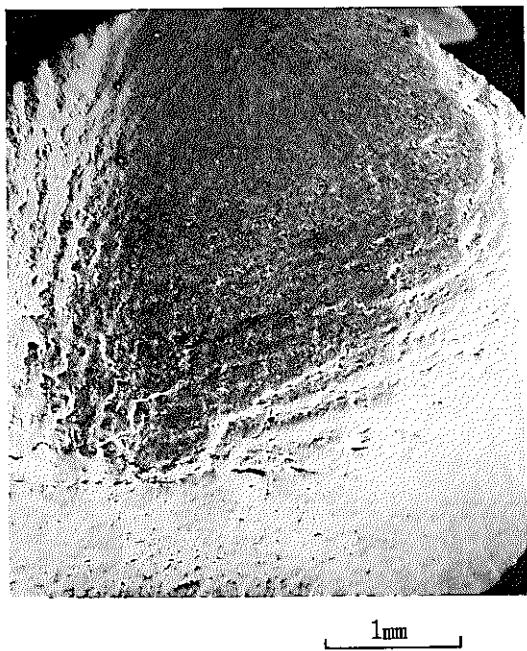
(c)



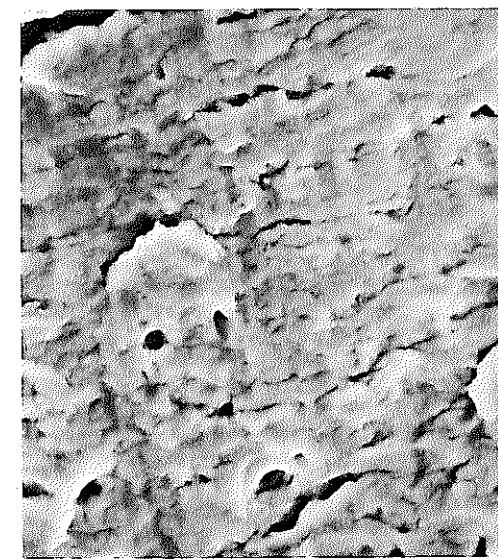
(d)

0.2 μm

Photo.7 MA957 のクリープ破断試験後の抽出レプリカ観察
(700°C, $t_R = 4268.7\text{ h}$)



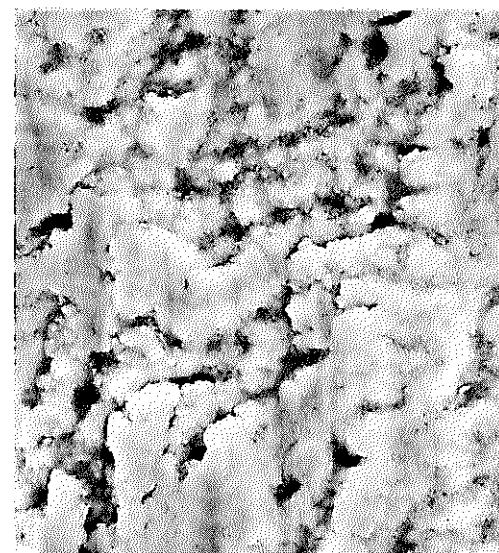
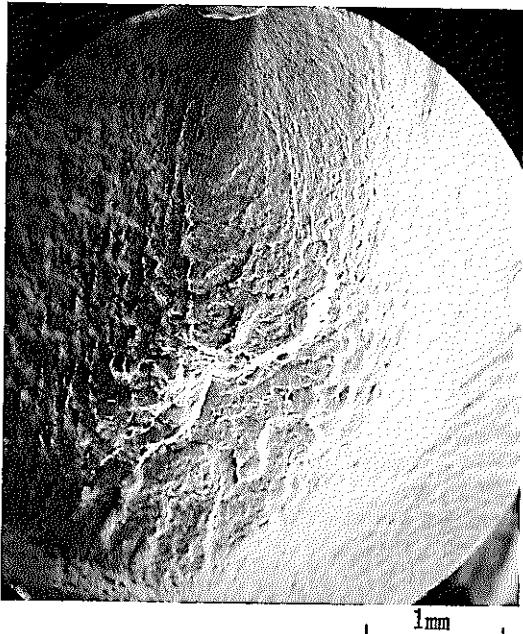
(a) クラック起点部近傍



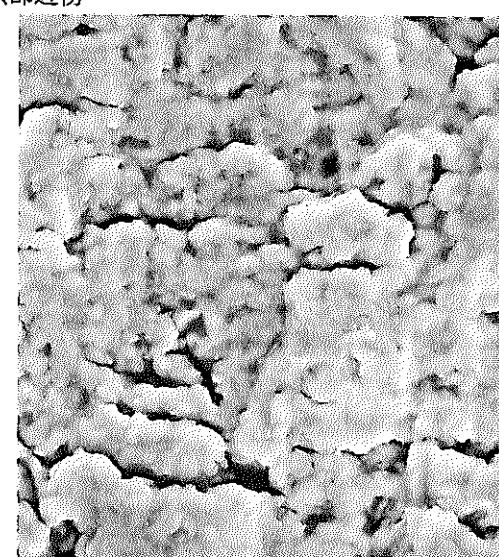
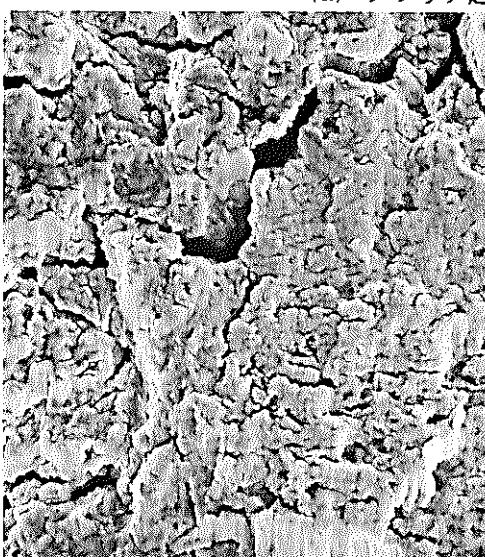
(b) クラック起点より 2 mm 内部

Photo.8 550°C低サイクル疲労試験片の
破面観察 (MA957)

$\Delta \epsilon_T : 0.59\%$, Nf : 5675



(a) クラック起点部近傍



(b) クラック起点部より 2 mm 内部

Photo.9 650°C低サイクル疲労試験片の
破面観察(MA957)

$\Delta \epsilon_T : 0.5\%$, Nf : 7247

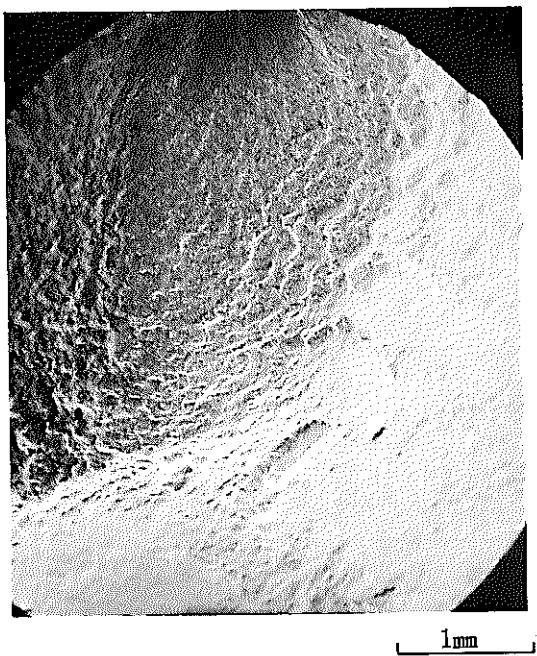
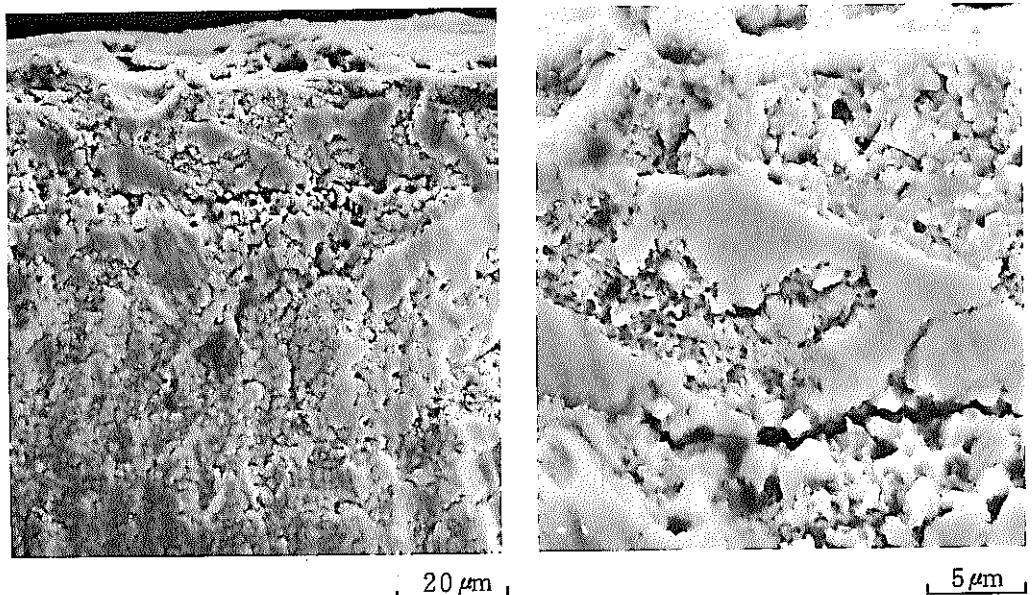
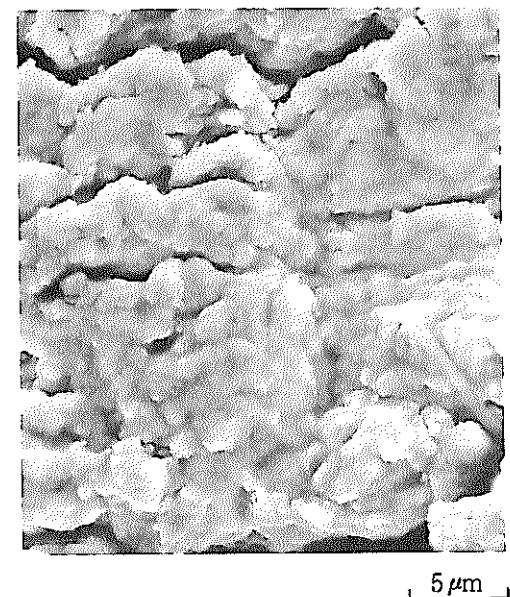


Photo.10 750°C低サイクル疲労試験片の
破面観察 (MA957)
 $\Delta \epsilon_T : 0.5\%$, Nf: 5469

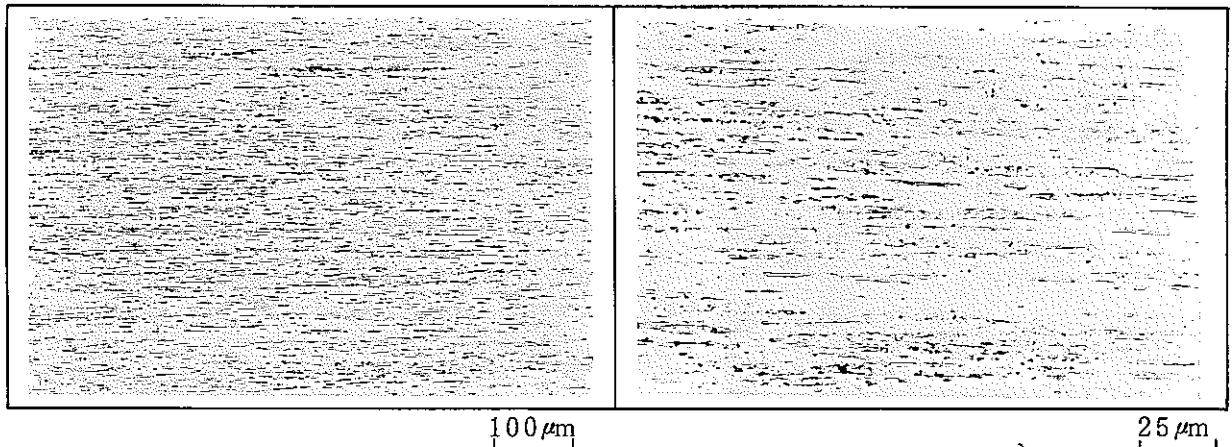


(a) クラック起点部近傍



(b) クラック起点部より 2mm 内部

均一部



破断部

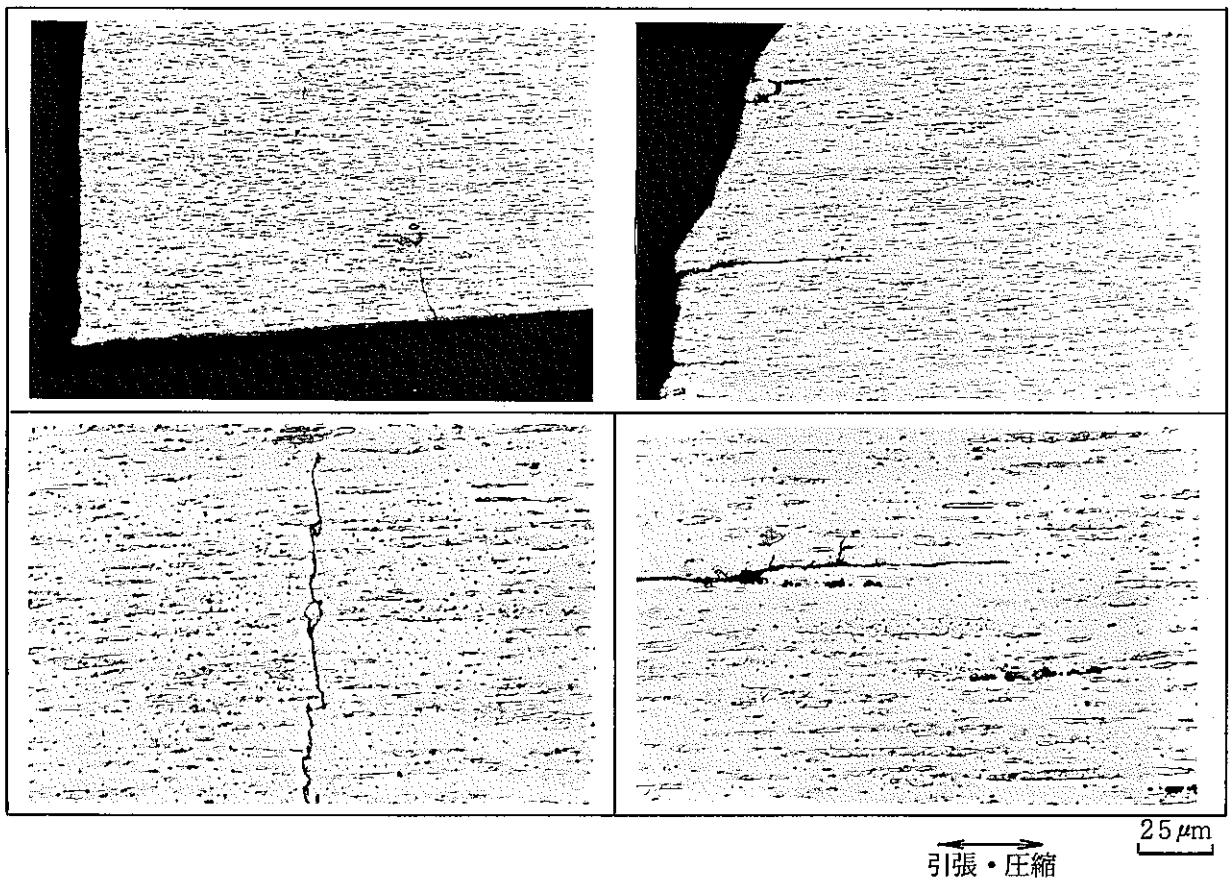
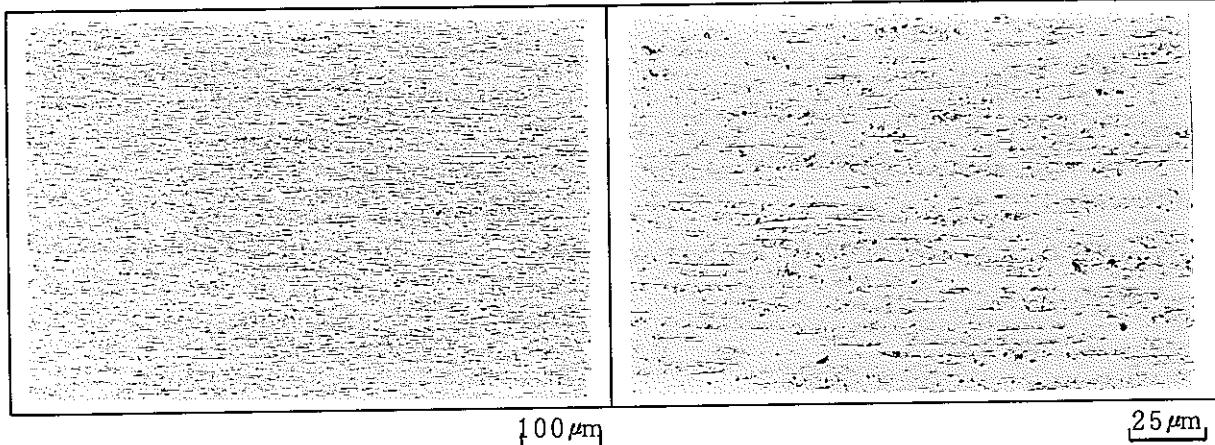


Photo.11 550°C低サイクル疲労試験片の断面ミクロ組織

$\Delta\epsilon_T : 0.59\%$, $N_f : 5,675$

均一部



破断部

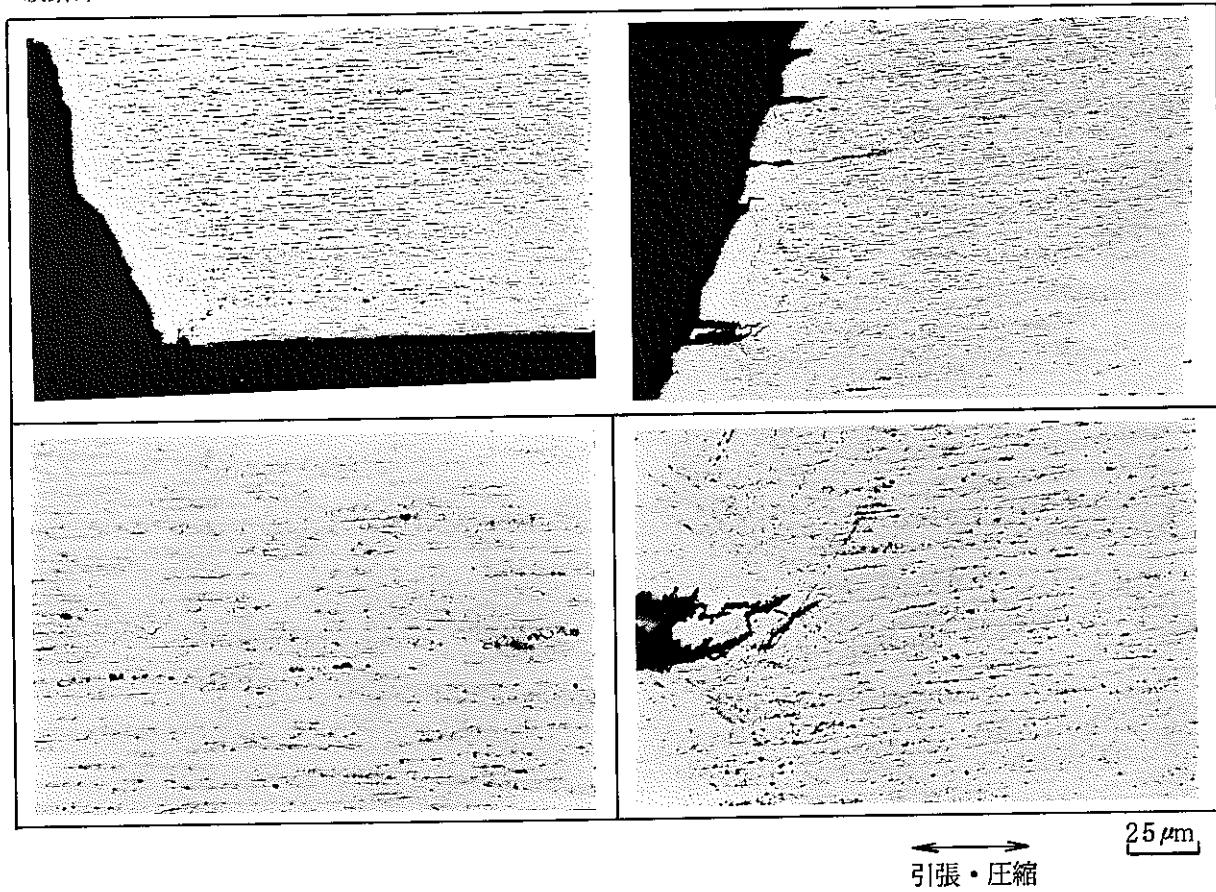
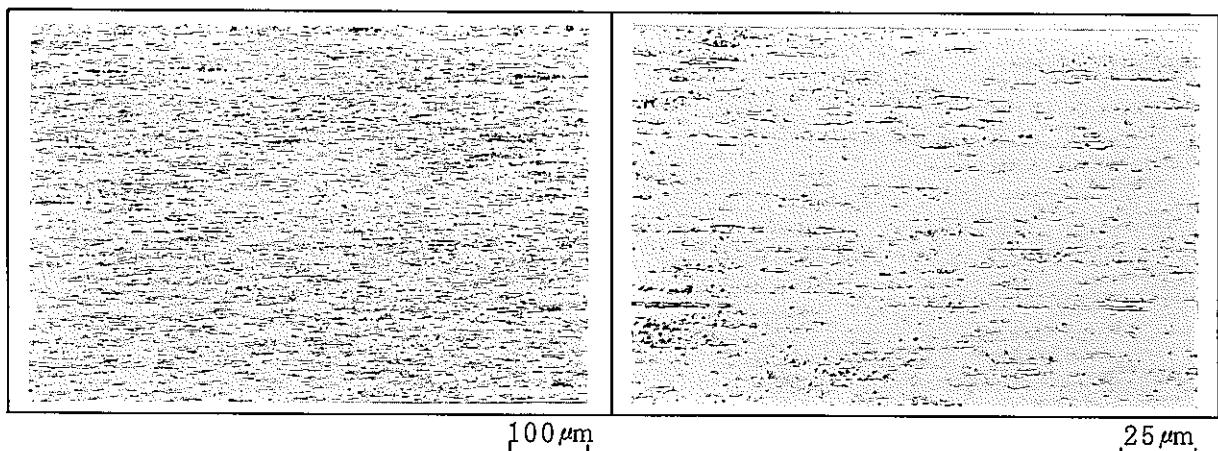


Photo.12 650°C低サイクル疲労試験片の断面ミクロ組織

$\triangle \epsilon_T : 0.5\%$, N_f : 7,247

均一部



破断部

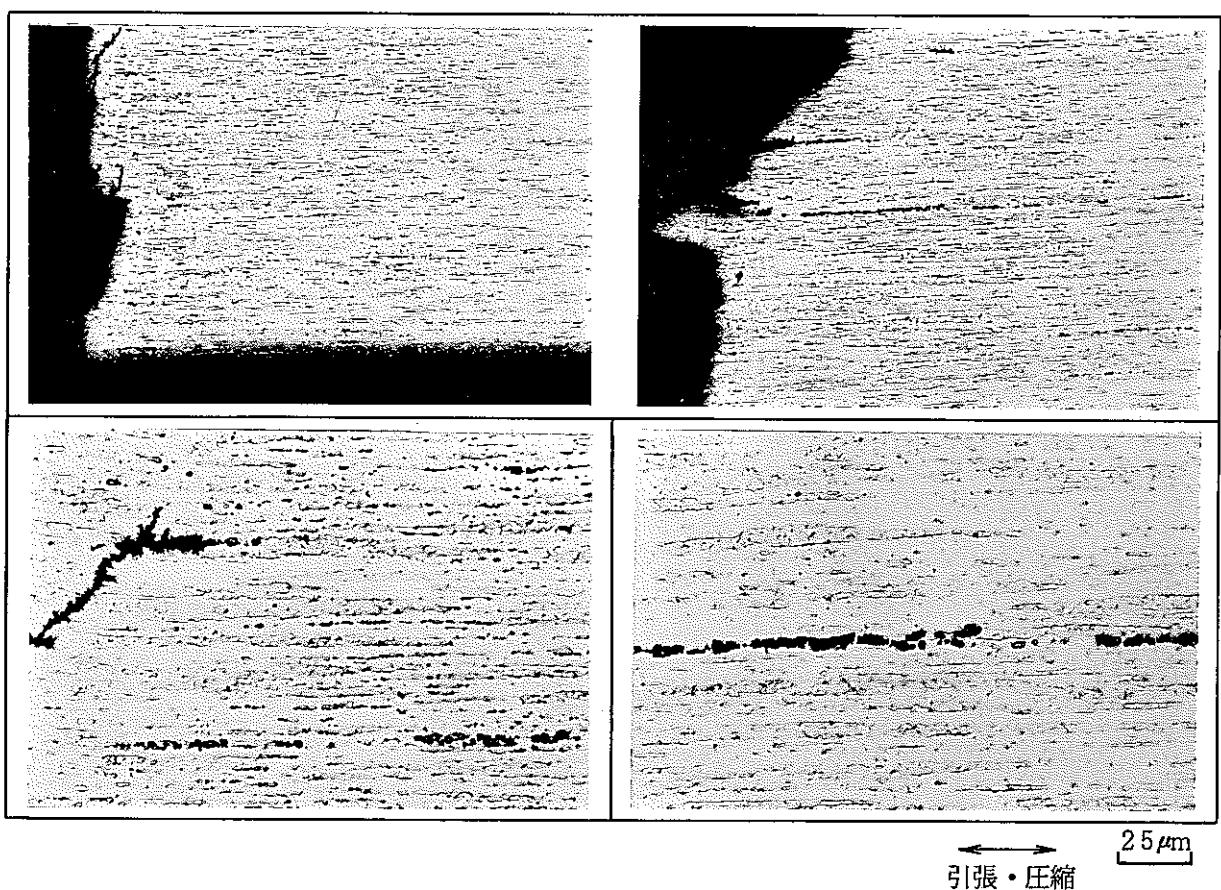


Photo.13 750°C低サイクル疲労試験片の断面ミクロ組織

$\triangle \epsilon_T : 0.5\%$, $N_f : 5,469$