

JAERI-M

6 2 1 3

多目的高温ガス実験炉用  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼および  
ハステロイ-Xの設計データに関する調査

1975年8月

吉平 恒夫・鈴木 道明<sup>\*</sup>・宇賀 丈雄

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

多目的高温ガス実験炉用  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼および  
ハステロイ-Xの設計データに関する調査

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

古平 恒夫, 鈴木 道明, \*宇賀 丈雄

(1975年7月30日受理)

多目的高温ガス実験炉の高温構造設計指針の作成に際して、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼（焼なまし材）およびハステロイ-Xの設計応力強さの妥当性の評価、あるいは、設計応力強さ決定のために、国内外の文献、カタログ、技術資料等を調査し、検討した結果をまとめたものである。なお、これらの材料の設計応力強さは、ASME Section IIIおよびCode Case 1592 の決定基準に準拠して求めている。

\* 1974年6月～12月の間、動力炉開発管理室熱中性子炉設計班（現在の動力炉開発安全性研究管理部多目的炉設計研究室）に外来研究員として勤務、現在、川崎重工業（株）ボイラ事業部川崎ボイラ工場原子力部

Material Design Data of  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel and Hastelloy-X for the  
Experimental Multi-purpose Very-high Temperature Gas-cooled Reactor

Tsuneo KODAIRA, Michiaki SUZUKI\* and Takeo UGA

Division of Reactor Safety, Reactor Safety Research Center, JAERI

( Received July 30, 1975 )

The preliminary structural design guidelines for the Experimental Multi-purpose Very-high Temperature Gas-cooled Reactor have recently been prepared. The components of the primary system operating at temperatures of creep dominant range are grouped in those of pressure and temperature boundaries respectively. In the material selection,  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel is chosen for the former and Hastelloy-X for the latter taking into account of material properties at operating temperature. Deriving from the literature in the field, material design data of the alloys are established in design forms such as  $S_y$ ,  $S_o$ ,  $S_m$ ,  $S_t$ , 100% of minimum stress to rupture, design fatigue curves, isochronous stress-strain curves, creep-fatigue interaction damage factor and so on, which are defined in ASME Code Section III, Code Case 1592.

\* Kawasaki Heavy Industry Co. Ltd.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 設計応力強さ $S_o$ , $S_m$ , $S_t$ の定め方 .....	2
3. $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼 .....	2
3.1 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の材料規格 .....	2
3.2 縦弾性係数, 線膨張係数 .....	2
3.3 最小降伏強さ, $S_y$ .....	2
3.4 $S_o$ , $S_m$ , $S_t$ .....	3
3.5 100%最小クリープ破断強さ .....	3
3.6 設計疲労曲線 .....	3
3.7 クリープ疲れの重畠効果の許容損傷係数 (D) .....	3
3.8 等時応力-歪曲線 .....	3
3.9 鞣性要求 .....	4
3.10 空気中における腐食代 .....	4
4. ハスティロイ-X .....	4
4.1 ハスティロイ-Xの材料規格 .....	4
4.2 縦弾性係数 .....	4
4.3 平均線膨張係数 .....	5
4.4 最小降伏強さ ( $S_y$ ) .....	5
4.5 平均引張強さ .....	5
4.6 $S_o$ .....	5
4.7 $S_m$ .....	6
4.8 $S_t$ .....	6
4.9 100%最小クリープ破断強さ .....	7
4.10 設計疲労曲線 .....	7
4.11 等時応力-歪曲線 .....	7
4.12 延性 .....	7
5. あとがき .....	8
6. 謝 辞 .....	9

## 1. まえがき

現在、日本原子力研究所において、多目的高温ガス実験炉の開発が行なわれているが、この中の一環として、高温構造設計指針の作成作業がワーキング・グループ（HWG-4と呼ばれている。）を中心に行なわれ、昭和50年2月に「多目的高温ガス実験炉高温構造設計指針（第1次案）」としてまとめられた。この設計指針は、その後の検討結果を加えて、近い将来、改訂版が出される予定である。

この構造設計指針における特徴として、冷却材出口温度1000°CのHe流体にさらされる高温部とシステムの圧力を保持するための圧力部に構造を分離していることが挙げられる。これに伴って、使用材料も適用設計コード使用、および製造実績、高温強度、加工性、溶接性、原子炉不純物レベルのヘリウム中における環境効果等を考慮して、圧力部材料に $2\frac{1}{4}$ Cr-Mo鋼（焼なまし材）、高温部材料にハステロイ-Xが採用されている。

また、この設計指針における設計条件から明らかのように、高温部のみならず、圧力部においてもクリープ域で使用される部材があり、従って設計も非クリープ域とクリープ域に分けられ、材料の設計応力強さも異なったクライテリアにより定められる必要がある。今回の構造設計指針においては、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼（焼なまし材）の場合、前者に対してASME Sec. III<sup>1)</sup>、後者に対してCode Case 1592<sup>2)</sup>に準拠して設計応力強さを定めている。ハステロイ-Xの場合には、従来の構造設計コードの適用範囲を越えているため、国内外で今迄に発表された文献等における材料試験データを収集、整理し、設計応力強さを求めている。

本報告は、今回の構造設計指針作成作業に際して $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼（焼なまし材）およびハステロイ-Xの設計応力強さの妥当性の評価、あるいは設計応力強さの決定のために、文献等を調査し、検討した結果をまとめたものであり、いわば、「多目的高温ガス実験炉高温構造設計指針」の参考資料と云うべきものである。本報告書をまとめるに際して、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼（焼なまし材）の場合には、ASME, Sec. III<sup>1)</sup>およびCode Case 1592<sup>2)</sup>にほぼ設計応力強さが与えられていたので、今迄に国内外で発表された $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼に関する30数篇の文献、技術資料等の中から焼なまし処理材の材料特性値に関する約20篇を選択し、主として設計応力強さの妥当性をチェックした。一方ハステロイ-Xの場合には、前述のように、従来の構造設計コードの適用範囲を越えているため、今迄に発表された国内外の50数篇の文献、カタログ、技術資料の中の有用な20数篇を基にして、ASME Sec. III<sup>1)</sup>およびCode Case 1592<sup>2)</sup>の設計応力強さの項目に準拠し、種々の材料試験データの整理を行ない、ハステロイ-Xの設計応力強さを定めた。なお、これらの材料の材料試験データの収集、整理に際しては前提条件として、温度範囲は多目的高温ガス炉の設計条件から $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼（焼なまし材）で室温～600°C、ハステロイ-Xで室温、400°C～1100°Cと設定し、また、実験炉の使用寿命を20年として、これら材料の設計データを得ることを目標とした。また、今回の設計指針において、溶接部強度は施工条件に依存し、溶接継手性能が左右されるため、ハステロイ-Xの場合には充分なデータが得られていないので、ここでは設計応力強さに考慮するまでに至っていない。

本報告において、設計応力強さの曲線が実線もしくは破線で示されているが、これらは以下

の意味で用いているものである。

①  $2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo鋼の場合

実線：ASME, Sec. III<sup>1)</sup>およびCode Case 1592<sup>2)</sup>あるいは他のCode Caseに準拠したもの。

破線：設計応力強さとして確定してなく、暫定值的なもの。

② ハステロイ-X

実線：暫定值的なもの。

破線：材料試験データが少なく、今後の研究開発の進展を待って検討すべきもの。

## 2 設計応力強さ $S_o$ , $S_m$ , $S_t$ の定め方

ASMEの設計コードにおける  $S_o$ ,  $S_m$ ,  $S_t$  の決定基準を表1に示す。これらの中で  $S_t$  は Jakubら<sup>3)</sup>の定義によるものを採用した。なお、 $S_t$  の決定基準の1つとして、第3次クリープを引起す最小応力の100%をとるという Blackburnら<sup>4)</sup>の見解もあるが、本報告では、安全側にという意味で第3次クリープの場合には、Jakubら<sup>3)</sup>の80%という値をとっている。

## 3 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼

### 3.1 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の材料規格

$2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo鋼は、表2に示したように、同じ化学成分を有していても施す熱処理により金属組織が異なり、従って機械的性質も変化する。ASME, Sec. III, Code Case 1592<sup>2)</sup>では焼なまし処理の  $2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo鋼のみが対象材料となっており、今回の構造設計指針もこれに準拠した。従って、表2からわかるように、鋼板ではASTM A387D、钢管ではJIS STBA 24およびASTM A213-T22の焼なまし処理の場合が相当規格となる。また、この場合、C量は0.07~0.15%でなければならない。

### 3.2 縦弾性係数、線膨張係数

今回の構造設計指針では、これらの物理定数は、ASME Sec. III, Code Case 1592<sup>2)</sup>の値を採用した。

### 3.3 最小降伏強さ、 $S_y$

図1は、今回の構造設計指針における最小降伏強さ ( $S_y$ ) を示したものであり、同じく Code Case 1592<sup>2)</sup>に準拠している。図2は、 $2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo鋼の降伏強さに関する検討結果を示している。この図からわかるように、ASME Sec. III<sup>1)</sup>における最小降伏強さ ( $S_y$ ) は、Code Case 1592<sup>2)</sup>のそれを高温測で下廻っている。これはCode Case 1592<sup>2)</sup>で高温強度に重要な役割を果たすC量の下限値を0.07%と規制していることにより、高温強度を引

の意味で用いているものである。

①  $2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo鋼の場合

実線：ASME, Sec. III<sup>1)</sup>およびCode Case 1592<sup>2)</sup>あるいは他のCode Caseに準拠したもの。

破線：設計応力強さとして確定してなく、暫定值的なもの。

② ハステロイ-X

実線：暫定值的なもの。

破線：材料試験データが少なく、今後の研究開発の進展を待って検討すべきもの。

## 2 設計応力強さ $S_o$ , $S_m$ , $S_t$ の定め方

ASMEの設計コードにおける  $S_o$ ,  $S_m$ ,  $S_t$  の決定基準を表1に示す。これらの中で  $S_t$  は Jakubら<sup>3)</sup>の定義によるものを採用した。なお、 $S_t$  の決定基準の1つとして、第3次クリープを引起す最小応力の100%をとるというBlackburnら<sup>4)</sup>の見解もあるが、本報告では、安全側にという意味で第3次クリープの場合には、Jakubら<sup>3)</sup>の80%という値をとっている。

## 3 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼

### 3.1 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の材料規格

$2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo鋼は、表2に示したように、同じ化学成分を有していても施す熱処理により金属組織が異なり、従って機械的性質も変化する。ASME, Sec. III, Code Case 1592<sup>2)</sup>では焼なまし処理の  $2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo鋼のみが対象材料となっており、今回の構造設計指針もこれに準拠した。従って、表2からわかるように、鋼板ではASTM A387D、钢管ではJIS STBA 24およびASTM A213-T22の焼なまし処理の場合が相当規格となる。また、この場合、C量は0.07~0.15%でなければならない。

### 3.2 縦弾性係数、線膨張係数

今回の構造設計指針では、これらの物理定数は、ASME Sec. III, Code Case 1592<sup>2)</sup>の値を採用した。

### 3.3 最小降伏強さ、 $S_y$

図1は、今回の構造設計指針における最小降伏強さ ( $S_y$ ) を示したものであり、同じく Code Case 1592<sup>2)</sup>に準拠している。図2は、 $2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo鋼の降伏強さに関する検討結果を示している。この図からわかるように、ASME Sec. III<sup>1)</sup>における最小降伏強さ ( $S_y$ ) は、Code Case 1592<sup>2)</sup>のそれを高温測で下廻っている。これはCode Case 1592<sup>2)</sup>で高温強度に重要な役割を果たすC量の下限値を0.07%と規制していることにより、高温強度を引

の意味で用いているものである。

①  $2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo鋼の場合

実線：ASME, Sec. III<sup>1)</sup>およびCode Case 1592<sup>2)</sup>あるいは他のCode Caseに準拠したもの。

破線：設計応力強さとして確定してなく、暫定值的なもの。

② ハステロイ-X

実線：暫定值的なもの。

破線：材料試験データが少なく、今後の研究開発の進展を待って検討すべきもの。

## 2 設計応力強さ $S_o$ , $S_m$ , $S_t$ の定め方

ASMEの設計コードにおける  $S_o$ ,  $S_m$ ,  $S_t$  の決定基準を表1に示す。これらの中で  $S_t$  は Jakub ら<sup>3)</sup>の定義によるものを採用した。なお、 $S_t$  の決定基準の1つとして、第3次クリープを引起す最小応力の100%をとるというBlackburn ら<sup>4)</sup>の見解もあるが、本報告では、安全側にという意味で第3次クリープの場合には、Jakub ら<sup>3)</sup>の80%という値をとっている。

## 3 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼

### 3.1 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の材料規格

$2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo鋼は、表2に示したように、同じ化学成分を有していても施す熱処理により金属組織が異なり、従って機械的性質も変化する。ASME, Sec. III, Code Case 1592<sup>2)</sup>では焼なまし処理の  $2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo鋼のみが対象材料となっており、今回の構造設計指針もこれに準拠した。従って、表2からわかるように、鋼板ではASTM A387D、钢管ではJIS STBA 24およびASTM A213-T22の焼なまし処理の場合が相当規格となる。また、この場合、C量は0.07~0.15%でなければならない。

### 3.2 縦弾性係数、線膨張係数

今回の構造設計指針では、これらの物理定数は、ASME Sec. III, Code Case 1592<sup>2)</sup>の値を採用した。

### 3.3 最小降伏強さ、 $S_y$

図1は、今回の構造設計指針における最小降伏強さ ( $S_y$ ) を示したものであり、同じく Code Case 1592<sup>2)</sup>に準拠している。図2は、 $2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo鋼の降伏強さに関する検討結果を示している。この図からわかるように、ASME Sec. III<sup>1)</sup>における最小降伏強さ ( $S_y$ ) は、Code Case 1592<sup>2)</sup>のそれを高温測で下廻っている。これはCode Case 1592<sup>2)</sup>で高温強度に重要な役割を果たすC量の下限値を0.07%と規制していることにより、高温強度を引

上げることができたためと考えられる。このことは、図中に併せて示した低C量のデータ<sup>5)</sup>（○および△で示した0.010%Cおよび0.042%Cのもの）が、他のデータよりかなり降伏強さが低く出ていることからも理解できる。

### 3.4 So, Sm, St

今回の構造設計指針においては、これらの設計応力強さは、ASME Sec. III<sup>2)</sup>およびCode Case 1592<sup>2)</sup>に準拠して採用した。

### 3.5 100%最小クリープ破断強さ

図3は、構造設計指針に採用した100%最小クリープ破断強さを示しており、これもCode Case 1592<sup>2)</sup>に準拠している。図4は、この100%最小クリープ破断強さと他の文献<sup>8, 11, 12)</sup>におけるデータを比較したものである。この図から、500°, 550°, 600°Cのいずれの温度においても、溶接継手のデータも含めて、すべて設計指針における100%最小クリープ破断強さを上回っていることがわかる。なお、試験された材料のC量はすべて0.07%以上であり、高温強度とくにクリープ破断強度にはCが大きな影響を及ぼすため、C量の下限値の規制は重要である。

### 3.6 設計疲労曲線

$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の設計疲労曲線は、Code Case 1592<sup>2)</sup>には示されていないので、今回の設計指針においては、ASME Sec. III, Code Case 1331-4<sup>15)</sup>における疲れ曲線を採用した。図5に全歪範囲と破断繰返し数との関係で整理した設計疲労曲線を示す。なお、Code Case 1331-4<sup>15)</sup>には、縦軸が応力で与えられているが、これを縦弾性係数を介して歪に直して今回の設計疲労曲線とした。

図6は、この設計疲労曲線と他の文献<sup>6, 13, 14)</sup>におけるデータを比較したものである。同図から明らかのようにデータ点はすべて上回っており、今回の設計疲労曲線が妥当なものであることがわかる。

### 3.7 クリープ疲れの重畠効果の許容損傷係数(D)

図7は、クリープ疲れの重畠効果の許容損傷係数(D)を示している。

図8は、図7の許容損傷係数(D)を与える根拠を示したものである。同図に示したKrempelらの結果<sup>16)</sup>は、疲れ損傷の割合が小さい領域のデータが多いけれども、拡大図からわかるように、線型則(図中の破線)を下回っているケースがある。従って安全側に評価して、今回は図中の実線を採用した。これはCode Case 1592<sup>2)</sup>の304, 316タイプステンレス鋼と同じ損傷係数(D)を与えるものである。

### 3.8 等時応力-歪曲線

今回の設計指針では、371°, 400°, 450°, 500°, 550°, 600°Cにおける等時応力-歪曲線を与えており、これらは、Code Case 1592<sup>2)</sup>に準拠して定められたものである。

### 3.9 韧性要求

今回の設計指針では、圧力容器用鋼材に対する韌性要求として標準Vシャルピー衝撃試験における上部棚エネルギーが  $75 \text{ ft} \cdot \text{lb}$  ( $10.4 \text{ kgm}$ ) 以上、および ASME Sec. III, NB 2331<sup>1)</sup>に準拠して  $RT_{NDT}^*$  を求めることとしている。これは、いずれも圧力容器の不安定破壊に対する配慮からであり、 $75 \text{ ft} \cdot \text{lb}$  の上部棚エネルギー要求は、軽水炉圧力容器の監視試験に関する規定である ASTM E 185-73<sup>17)</sup> を参考とした。このエネルギー要求は、図 9 にシャルピー衝撃遷移曲線の例<sup>11, 14)</sup>を示したように、焼なまし処理材でも満足していることがわかる。しかしながら厚肉の場合に焼なまし処理でこの要求を満足できるか否か検討されるべきである。また  $RT_{NDT}$  の要求は、ASME Sec. III, Appendix G<sup>1)</sup>に述べられているように、原子炉圧力容器の構造安全性を破壊力学的手法により評価するための基礎資料を得るためにある。

### 3.10 空気中における腐食代

図 10 は、Goldmann<sup>18)</sup>による空気中における  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼の腐食代を示したものである。この図から、 $510^\circ\text{C}$  以下では酸化がほとんど問題にならないことがわかる。

## 4 ハステロイ-X

### 4.1 ハステロイ-Xの材料規格

ハステロイ-Xは、Cr, Mo, Feを含んだ Ni 基の固溶強化型の耐熱材料であり、現在、規格として、ASTM B435 (Sheet & Plate), ASTM B572 (Rod), AMS 5536 G (Sheet & Plate) および AMS 5754 G (Bar, Forging & Ring) がある。参考のために表 3 にハステロイ-Xの ASTM 規格を示す。

なお、ハステロイ-Xは、本報告から一般の構造材料に比べて、材料特性値のバラツキが大きいことがわかるであろう。しかしながら、材料仕様の規制、適正化により、とくに高温長時間側での材料特性を改善し得る可能性がある。現在、材料設計という立場から、ハステロイ-Xの材料仕様の最適化を行なおうとする動きはないが、多目的高温ガス実験炉に具体的に適用する前迄には、このことが是非とも必要である。

### 4.2 縦弾性係数

図 11 は、今回の構造設計指針におけるハステロイ-Xの縦弾性係数を示す。

図 12 は、この縦弾性係数の根拠を示したものであり、今回の設計指針では、OGL-1 高温構造設計指針<sup>21)</sup>の値（図中の実線）を採用した。ただし、このデータは  $900^\circ\text{C}$  までしかない

\*  $RT_{NDT}$  の定義は ASME Sec. III, NB 2331 によればつきのようになっている。先ず落重試験により鋼材の NDT を求め、この NDT より  $60^\circ\text{F}$  高い温度で V シャルピー衝撃試験を実施し、吸収エネルギー  $50 \text{ ft} \cdot \text{lb}$ 、横膨出量  $35 \text{ mil}$  の条件を満足していればこの NDT が  $RT_{NDT}$  となる。もし満足していないければ更に高温で V シャルピー試験を行ない、上記条件を満足した温度より  $60^\circ\text{F}$  を差引いた温度が  $RT_{NDT}$  となる。

### 3.9 韧性要求

今回の設計指針では、圧力容器用鋼材に対する韌性要求として標準Vシャルピー衝撃試験における上部棚エネルギーが  $75 \text{ ft} \cdot \text{lb}$  ( $10.4 \text{ kNm}$ ) 以上、および ASME Sec. III, NB 2331<sup>1)</sup>に準拠して  $RT_{NDT}^*$  を求めることとしている。これは、いずれも圧力容器の不安定破壊に対する配慮からであり、 $75 \text{ ft} \cdot \text{lb}$  の上部棚エネルギー要求は、軽水炉圧力容器の監視試験に関する規定である ASTM E 185-73<sup>17)</sup> を参考とした。このエネルギー要求は、図 9 にシャルピー衝撃遷移曲線の例<sup>11, 14)</sup>を示したように、焼なまし処理材でも満足していることがわかる。しかしながら厚肉の場合に焼なまし処理でこの要求を満足できるか否か検討されるべきである。また  $RT_{NDT}$  の要求は、ASME Sec. III, Appendix G<sup>1)</sup>に述べられているように、原子炉圧力容器の構造安全性を破壊力学的手法により評価するための基礎資料を得るためである。

### 3.10 空気中における腐食代

図 10 は、Goldmann<sup>18)</sup>による空気中における  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼の腐食代を示したものである。この図から、 $510^\circ\text{C}$  以下では酸化がほとんど問題にならないことがわかる。

## 4 ハステロイ-X

### 4.1 ハステロイ-Xの材料規格

ハステロイ-Xは、Cr, Mo, Feを含んだNi基の固溶強化型の耐熱材料であり、現在、規格として、ASTM B435 (Sheet & Plate), ASTM B572 (Rod), AMS 5536 G (Sheet & Plate) および AMS 5754 G (Bar, Forging & Ring) がある。参考のために表 3 にハステロイ-XのASTM規格を示す。

なお、ハステロイ-Xは、本報告から一般の構造材料に比べて、材料特性値のバラツキが大きいことがわかるであろう。しかしながら、材料仕様の規制、適正化により、とくに高温長時間側での材料特性を改善し得る可能性がある。現在、材料設計という立場から、ハステロイ-Xの材料仕様の最適化を行なおうとする動きはないが、多目的高温ガス実験炉に具体的に適用する前迄には、このことが是非とも必要である。

### 4.2 縦弾性係数

図 11 は、今回の構造設計指針におけるハステロイ-Xの縦弾性係数を示す。

図 12 は、この縦弾性係数の根拠を示したものであり、今回の設計指針では、OGL-1 高温構造設計指針<sup>21)</sup>の値（図中の実線）を採用した。ただし、このデータは  $900^\circ\text{C}$  までしかない

\*  $RT_{NDT}$  の定義は ASME Sec. III, NB 2331 によればつきのようになっている。先ず落重試験により鋼材の NDT を求め、この NDT より  $60^\circ\text{F}$  高い温度で V シャルピー衝撃試験を実施し、吸収エネルギー  $50 \text{ ft} \cdot \text{lb}$ 、横膨出量  $35 \text{ mil}$  の条件を満足していればこの NDT が  $RT_{NDT}$  となる。もし満足していないければ更に高温で V シャルピー試験を行ない、上記条件を満足した温度より  $60^\circ\text{F}$  を差引いた温度が  $RT_{NDT}$  となる。

ので、1000°Cへは直線で外挿している。他のデータのバラツキ具合からみて妥当なものと思われる。

#### 4.3 平均線膨張係数

図13は、今回の設計指針の平均線膨張係数を示している。

図14は、この平均線膨張係数の出典を示したものであり、OGL-1 高温構造設計指針<sup>21)</sup>（以下OGL-1）と同一のものである。

#### 4.4 最小降伏強さ (S\_y)

図15は、今回の構造設計指針における最小降伏強さ (S\_y) を示している。この最小降伏強さは、図16～図18に示す手順に従って求められた。

すなわち、図16に示すように、文献<sup>20)</sup>の溶体化処理材（図中○印）\*について、多項式近似、最小二乗法による最適曲線化のプログラムを使用し、あてはめを検討して、6次の多項式近似で求めた平均降伏強さが図中の破線である。図17にこの降伏強さを他のデータと比較して示したように、妥当な値となっていることがわかる。この平均降伏強さから、最小降伏強さ (S\_y) を求めるため、図16に示すように、室温における溶体化処理材（○印）のバラツキ範囲を統計処理し、標準偏差から95%信頼限界の下限値を定めた。この下限値は、ハスティロイ-Xの仕様最小降伏強さとほぼ一致している。そして、この室温における降伏強さの下限値と平均値の比をとり、高温側の平均降伏強さをこの比で落して求めたものが同図に実線で示した最小降伏強さ (S\_y) である。

図18は、今回の降伏強さをOGL-1<sup>21)</sup>の場合と比較して示すが、最小降伏強さ (S\_y) は若干高くなっていることがわかる。

#### 4.5 平均引張強さ

平均引張強さは、構造設計上、とくに用いられないが後述する S\_o, S\_m を定めるために必要であるので、求めてみた。

図19は、今回のハスティロイ-Xの平均引張強さを示す。この平均引張強さの根拠は、図20に示されている。前述した最小降伏強さの場合と同様に、文献<sup>20)</sup>の溶体化処理材（図中○印）について、多項式近似の最適曲線化用の計算プログラムにより、あてはめを検討して、5次の多項式近似により求めたものである。同図には、他のデータも併せて示してあるが、妥当な値となっていることがわかる。

#### 4.6 S\_o

図21に、今回の S\_o を示す。この図において、約 600°C 以上の温度範囲における S\_o が与えられていない。これは、表1に示したように、クリープ域における S\_o 値を求めるためには、

\* このデータを用いた理由は、我が国において工業的規模で溶製したハスティロイ-Xについて、各機関で標準試料として試験を実施し、比較的データが豊富なためである。



#### 4.9 100%最小クリープ破断強さ

図29には、今回の設計指針における100%最小クリープ破断強さが示してある。この最小クリープ破断強さは、図30～図32を根拠に求められている。

すなわち、図30は、700～800°C、図31は800～900°Cの温度範囲における国内外のクリープデータを今回の100%最小クリープ破断強さと比較して示したものである。これらの図から明らかのように、700°, 750°, 800°および850°Cにおいては、データ点が最小クリープ破断強さを上廻っている。これらの100%最小クリープ破断強さ曲線は、OGL-1<sup>21)</sup>と同一のものであり、日本原子力研究所と金属材料技術研究所との共同研究によるクリープ試験の結果を基に、回帰分析、統計的処理を行なって定められており、 $5 \times 10^4$  hrまで設計データが与えられている。しかしながら、図32の900°Cの場合には、データ点がかなり下廻っており、また図32の950°Cおよび1000°Cの場合は、OGL-1<sup>21)</sup>では100%最小クリープ破断強さが与えられていない。そこで、今回は、900°, 950°, 1000°Cの100%最小クリープ破断強さは、これらの国内外のデータを基にして、いわゆる visual fitで強引に最小値を求めてしまっている。従って、今後、長時間データの出て来るのを待つて、回帰分析によるあてはめを行ない、統計的処理を行なって最小クリープ破断強さが求められる必要がある。

#### 4.10 設計疲労曲線

図33は、今回の設計疲労曲線を示したものであり、この曲線はCardenの結果<sup>23)</sup>を基に、ASMEコードの設計疲労曲線の決定法、すなわち、歪範囲で $\frac{1}{2}$ 、破断繰返し数で $\frac{1}{20}$ に落し、小さい方を採用するという方法で作成したものである。また、破断繰返し数は、Carden<sup>23)</sup>の実験条件を考慮し、 $10^3$ サイクルまでとした。

図34は、この設計疲労曲線を我国における800°Cおよび900°Cにおけるデータ<sup>41)</sup>と比較したものであり、データ点が設計曲線を上廻っていることがわかる。現時点では、疲れ試験データはこの2つであり、データの蓄積が急務であろう。

#### 4.11 等時応力一歪曲線

図35(a)～図35(h)には、650°, 700°, 750°, 800°, 850°, 900°, 950°および1000°Cにおける等時応力一歪曲線が示してある。これらの曲線を引く根拠になったものは、図36に示した文献<sup>42)</sup>のクリープ設計曲線である。

図37に他の設計曲線と比較して982°Cの例を示すが、今回採用したクリープ設計曲線の方が、同じ歪を与えるのに応力は小さく、従って安全側に出ていることがわかる。しかしながら、等時応力一歪曲線を作成するためのデータは極端に少く、妥当性を論ずるには早計でありデータの蓄積が急務である。

#### 4.12 延性

多目的高温ガス実験炉のような高温構造においては、Code Case 1592<sup>2)</sup>に変形制限に関する基準が設けられているように、材料の延性は、重要な材料特性値の1つである。このよう

観点から、引張試験およびクリープ破断試験における延性（伸び、絞り）を整理した結果を、図38～図41に示した。

図38は、引張試験における伸び、図39は絞りの結果を示すが、高温側でバラツキがかなり大きくなっている。

図40および図41は、それぞれ、クリープ破断試験における伸びおよび絞りの場合を示すが、長時間側で延性が低下する傾向がみられる。横井ら<sup>39)</sup>のハスティロイーXのクリープ破断試験結果によれば、高温低応力側では、変形、破断のモードは局部絞りがほとんどなく、ウェッジ状のマイクロ・クラックによる粒界破断となることを報告しており、延性の低下は、このメカニズムから言っても構造設計上問題点と考えられる。

## 5 あとがき

多目的高温ガス実験炉の使用材料として、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼およびハスティロイーXについて材料特性値を調査整理し、適用設計コードの設計応力強さの妥当性、あるいは、適用設計コードのない場合は設計応力強さを求め、検討した結果を述べてきた。

今回の調査を通して感することは、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の場合には、材料の設計応力強さ等がほぼ整備されていると云うことができるであろうが、一方、ハスティロイーXの場合には、材料特性値に関するデータが乏しく、とくに、設計曲線を破線で示したS<sub>o</sub>、S<sub>t</sub>、100%最小クリープ破断強さ、設計疲労曲線、等時応力-歪曲線等は、暫定値と呼ぶにも不適当で、更に進行性変形、クリープ疲れの重畠効果に関してはデータが皆無と云ってよく、今後の研究開発の進展を待って、材料特性値を補強し、これらの設計応力強さを確立すべきであることを痛感する。

さらに、蓄積を必要とする材料データの項目を列挙すると以下のようになる。

- (1)  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼
  - ① クリープ疲れの重畠効果
  - ② 不安定破壊に関連した材料データ（破壊韌性など）
  - ③ 溶接継手性能の確認試験
  - ④ 原子炉不純物レベルのヘリウム中における材料試験データの蓄積
- (2) ハスティロイーX
  - ① 引張試験：室温～400°Cの間のデータの蓄積
  - ② クリープ試験：600～1100°C間のデータの蓄積
  - ③ クリープ破断試験：600～1100°Cの間の10<sup>5</sup> hr破断強度を推定できる程度の長時間試験データの蓄積。（とくに700°C以下および1000°C以上の場合はデータが極端に少ない。）
  - ④ 低サイクル疲れデータの蓄積
  - ⑤ クリープ疲れの重畠効果
  - ⑥ 進行性変形に関するデータの蓄積（熱ラチエット、クリープラチエット）

観点から、引張試験およびクリープ破断試験における延性（伸び、絞り）を整理した結果を、図38～図41に示した。

図38は、引張試験における伸び、図39は絞りの結果を示すが、高温側でバラツキがかなり大きくなっている。

図40および図41は、それぞれ、クリープ破断試験における伸びおよび絞りの場合を示すが、長時間側で延性が低下する傾向がみられる。横井ら<sup>39)</sup>のハスティロイーXのクリープ破断試験結果によれば、高温低応力側では、変形、破断のモードは局部絞りがほとんどなく、ウェッジ状のマイクロ・クラックによる粒界破断となることを報告しており、延性の低下は、このメカニズムから言っても構造設計上問題点と考えられる。

## 5 あとがき

多目的高温ガス実験炉の使用材料として、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼およびハスティロイーXについて材料特性値を調査整理し、適用設計コードの設計応力強さの妥当性、あるいは、適用設計コードのない場合は設計応力強さを求め、検討した結果を述べてきた。

今回の調査を通して感ずることは、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の場合には、材料の設計応力強さ等がほぼ整備されていると云うことができるであろうが、一方、ハスティロイーXの場合には、材料特性値に関するデータが乏しく、とくに、設計曲線を破線で示したSo, St, 100%最小クリープ破断強さ、設計疲労曲線、等時応力-歪曲線等は、暫定値と呼ぶにも不適当で、更に進行性変形、クリープ疲れの重畠効果に関してはデータが皆無と云ってよく、今後の研究開発の進展を待って、材料特性値を補強し、これらの設計応力強さを確立すべきであることを痛感する。

さらに、蓄積を必要とする材料データの項目を列挙すると以下のようになる。

### (1) $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼

- ① クリープ疲れの重畠効果
- ② 不安定破壊に関連した材料データ（破壊韌性など）
- ③ 溶接継手性能の確認試験
- ④ 原子炉不純物レベルのヘリウム中における材料試験データの蓄積

### (2) ハスティロイーX

- ① 引張試験：室温～400°Cの間のデータの蓄積
- ② クリープ試験：600～1100°C間のデータの蓄積
- ③ クリープ破断試験：600～1100°Cの間の10<sup>5</sup> hr破断強度を推定できる程度の長時間試験データの蓄積。（とくに700°C以下および1000°C以上の場合はデータが極端に少ない。）
- ④ 低サイクル疲れデータの蓄積
- ⑤ クリープ疲れの重畠効果
- ⑥ 進行性変形に関するデータの蓄積（熱ラチエット、クリープラチエット）

- (7) 溶接継手性能に関する各種試験データの蓄積
- (8) 原子炉不純物レベルのヘリウム中における各種材料試験データ

## 6 謝 辞

本報告を作成するにあたり、終始有益な御助言、御討論をいただいた HWG-4 グループリーダー野村末雄燃料工学部長をはじめグループ員の各位に深甚なる感謝の意を表します。また、貴重なデータを御提供いただいた川崎重工業(株)殿、新日本製鐵(株)殿に対し厚く御礼申し上げます。

- (7) 溶接継手性能に関する各種試験データの蓄積
- (8) 原子炉不純物レベルのヘリウム中における各種材料試験データ

## 6 謝 辞

本報告を作成するにあたり、終始有益な御助言、御討論をいただいた HWG-4 グループリーダー野村末雄燃料工学部長をはじめグループ員の各位に深甚なる感謝の意を表します。また、貴重なデータを御提供いただいた川崎重工業（株）殿、新日本製鉄（株）殿に対し厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III(1971)
- 2) Cases of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Case 1592,  
"Class 1 Component in Elevated Temperature Service, Sec. III" (1974)
- 3) M. T. Jakub et al., "Translating Elevated Temperature Material Properties into Rules for Structural Design," HEDL-SA-164
- 4) L. D. Blackburn et al., "Materials Creep Behavior and Elevated Temperature Design," Nucl. Tech. vol. 16 (1972) pp 278~286
- 5) D. L. Sponseller et al, "Effects of Low Carbon Contents and Exposures to Liquid Sodium on Elevated Temperature Behavior of  $2\frac{1}{4}$ %Cr-1%Mo Steel," AMS Report
- 6) R. C. Andrews et al, "Design Properties of One Heat of  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel and 316 Stainless Steel in High Temperature Air, Helium and Sodium Environments," MS AR-66-174 (1966)
- 7) 丸岡, "オーステナイトステンレス鋼とCr-Mo鋼との溶接に関する研究," 住友金属, vol. 14, No. 1
- 8) "金属材料高温強度データ集, 第1編," 日本学術振興会
- 9) 行俊, 西田, "低合金鋼の高温強度と組織," 住友金属, vol. 24, No. 1
- 10) "高温用钢管材料の高温強度特性(技術誌別冊)," 住友金属(昭和47年7月)
- 11) "高速炉蒸気発生器構造部材の溶接施工に関する研究(I)," 日本溶接協会FRW小委員会(昭48)
- 12) "高速炉蒸気発生器構造部材の溶接施工に関する研究(II)," 日本溶接協会FRW小委員会(昭49)
- 13) 平etal. "18-8Cb鋼および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の熱疲れと定ひずみ高温疲れ," 機械学会論文集, vol. 28(昭37), No. 191
- 14) "Symposium on  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel in Pressure Vessel and Piping," ASME (Sept. 1970) Denver, Colorado
- 15) Interpretations of ASME Boiler and Pressure Vessel Code Case 1331-4
- 16) E. Krempel and B. M. Wundt, "Hold-Time Effects in High-Temperature Low-Cycle Fatigue," AS TM-STP-489
- 17) ASTM Designation: E185-73, "Standards Recommended Practice for Surveillance Tests for Nuclear Reactor Vessels," Annual Book of ASTM Standards, 1973
- 18) K. Goldmann, "Environmental Design Factors for Sodium-Cooled Fast Reactors Components," IAEA-SM-130/62
- 19) "高温ガス炉耐熱材料研究会調査報告書," 日本学術振興会(昭47)

- 20) "高温ガス炉耐熱材料研究会調査報告書(第2集),"日本学術振興会(昭49)
- 21) "OGL-1高温構造設計指針(改訂版),"日本原子力研究所(昭48)
- 22) "Aerospace Structural Metals Handbook," Mechanical Properties Data Center, AFML-TR-68-115 (vol. IV) (1973)
- 23) A.E. Carden and T.B. Slade, "High Temperature Low-Cycle Fatigue Experiments on Hastelloy X," AS TM-STP-459(1969), pp 111~129
- 24) CABOT社, "Hastelloy Alloy X, Excellent High Temperature Strength and Oxidation Resistance to 2200 deg F."
- 25) "The Properties and Applications of Hastelloy X," Henry Wiggin & Company (1967)
- 26) 宇賀;私信
- 27) 川越, "Hastelloy Alloy Xの諸性質,"三菱金属(昭46)
- 28) J.W. Wunderlich & N.E. Baker, "Exposure of HTGR Candidate Core Plate and Thermal Insulation Materials to Impure Helium at 1650°F to 1850°F for 3000 hours," GAMD-7377(1966)
- 29) T.T. Claudson and H.J. Pessel, "Evaluation of Iron and Nickel Base Alloys for Medium and High Temperature Reactor Application," BNWL-154 (1965)
- 30) H.J. Pessel, "Evaluation of Iron and Nickel Base Alloys for Medium and High Temperature Reactor Applications," HW-67715(1961)
- 31) 近藤 et al; 私信
- 32) D.S. Duvall & W.A. Owezarski, "Further Heat Affected Zone Studies in Heat Resistant Nickel Alloys," Weld. Journal, (1967). 423S-432S
- 33) S. Nomura, "Test Results of Structural Materials for the In-pile and Out of Pile High Temperature Helium Gas Loop," JAERI
- 34) D.H. Nyman, "High Temperature Creep Rupture Properties of Hastelloy X in Vacuum," BNWL-167(1965)
- 35) Interpretations of ASME Boiler and Pressure Vessel Code Case 1321-3
- 36) 私信〔"OGL-1用材料の開発研究中間報告(第4報),"川崎重工(株)〕
- 37) 私信〔"OGL-1用材料の開発研究中間報告(第5報),"川崎重工(株)〕
- 38) 私信, 新日本製鉄(株) (1974)
- 40) 日本原子力研究所, 金属材料技術研究所共同研究報告書, 私信
- 41) "AMS 5536G(ハステロイ-X)改良合金について,"新日本製鉄(株) (昭49)
- 42) Joining Huntington Alloy Product Division, the International Nickel Company, INC.

表 1 2<sup>1/4</sup>Cr-1Mo鋼およびハスティロイ-XのSo, Sm, St値の決定基準

応力強さ限界値	適用する領域	材 料	応力強さ限界値の決定基準	応力強さ限界値	適用する領域	材 料	応力強さ限界値の決定基準
非クリップ域	2 <sup>1/4</sup> Cr-1Mo		(1)室温における仕様最小引張強さの1/4 (2)当該温度における平均引張強さの1/4 (3)室温における仕様最小降伏強さの5% (4)当該温度における平均降伏強さの5% 〔(1)～(4)の中で最小値をSoとする。〕	Sm	2 <sup>1/4</sup> Cr-1Mo		(1)室温における仕様最小引張強さの1/3 (2)当該温度における平均引張強さの1/3 (3)室温における仕様最小降伏強さの2/3 (4)当該温度における平均降伏強さの2/3 〔(1)～(4)の中で最小値をSmとする。〕
So	クリップ域	ハスティロイ-X	(1)室温における仕様最小引張強さの1/4 (2)当該温度における平均引張強さの1/4 (3)室温における仕様最小降伏強さの2/3 (4)当該温度における平均降伏強さの2/3 〔(1)～(4)の中で最小値をSoとする。〕	Sm	ハスティロイ-X		(1)室温における仕様最小引張強さの1/3 (2)当該温度における平均引張強さの1/3 (3)室温における仕様最小降伏強さの2/3 (4)当該温度における平均降伏強さの90% 〔(1)～(4)の中で最小値をSmとする。〕
St	クリップ域	2 <sup>1/4</sup> Cr-1Mo	(1)10 <sup>5</sup> ℃/hrのクリープ速度を与える平均応力 (2)10 <sup>5</sup> hr平均クリープ破断強さの3/2 (3)10 <sup>5</sup> hr最小クリープ破断強さの80% 〔(1)～(3)の中で最小値をSoとする。〕	St	2 <sup>1/4</sup> Cr-1Mo ハスティロイ-X		(1)1%の全歪を生ずるに要する平均応力の (80%**) (2)第3次クリープをおこす最小応力の(80%**) (3)最小破断応力の(2/3**) 〔(1)～(3)の中で最小値をStとする。〕

(注) \* 少し大きな変形まで許すとき

\*\* M.T. Jakub et al, "Translating Elevated Temperature Material Properties into Rules for Structural Design," HEDL-SA-164による。

表2 2½Cr-1Mo鋼に関する材料規格

規 格	種 別	熱 处 理	化 学 成 分 (%)						機 械 的 性 質				
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	耐 力 (kg/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)	
JIS STBA 24	管	Ann. またはNT	≤ 0.15	≤ 0.50	0.30 ~0.60	≤ 0.030	≤ 0.030	1.90 ~2.60	0.87 ~1.13	≥21	≥42	≥30	-
ASTM A213-T22	管	Ann. またはNT	"	"	"	"	"	"	"	≥21.1	≥42.2	"	-
ASTM A387D	板	Ann.	"	"	"	≤0.035	≤0.035	2.00 ~2.50	0.90 ~1.10	"	42.2	"	≤ 85
		NT	"	"	"	"	"	"	"	~59.8	≥18	≥45	-
ASTM A542 Class 1	板	QT	"	"	0.27 ~0.63	"	"	1.88 ~2.62	0.85 ~1.15	≥59.8 ~87.9	73.8 ~87.9	≥14	-

(注1) Ann.: 焼なまし

NT: 焼ならし+焼もどし  
QT: 焼入れ+焼もどし

(注2) ASME Sec. III, Case 1592 ではC■が0.07~0.15と規定されている。

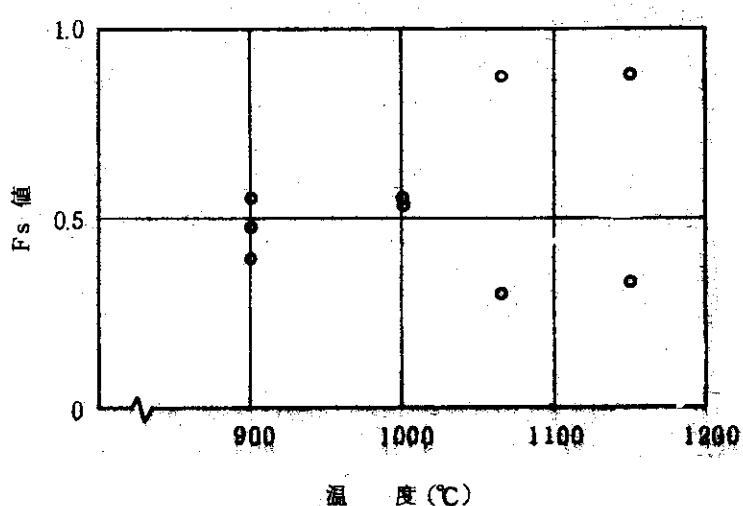
表3 ハステロイXに関する材料規格

適用規格 (ASTM)	① ASTM Designation : B435-71 Standard Specification for NICKEL-CHROMIUM-MOLYBDENUM-IRON ALLOY SHEET AND PLATE ② ASTM Designation : B572-72 Standard Specification for NICKEL-CHROMIUM-MOLYBDENUM-IRON ALLOY ROD																																																
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>C</th><th>Mn</th><th>Si</th><th>P</th><th>S</th><th>Cr</th><th>Co</th><th>Mo</th><th>W</th><th>Fe</th><th>Ni</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.05 ~0.15</td><td>&lt;1.00</td><td>&lt;1.00</td><td>&lt;0.040</td><td>&lt;0.030</td><td>20.5 ~23.0</td><td>0.5 ~2.5</td><td>8.0 ~10.0</td><td>0.20 ~1.0</td><td>17.0 ~200</td><td>Ba/B</td></tr> </tbody> </table>											C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo	W	Fe	Ni	0.05 ~0.15	<1.00	<1.00	<0.040	<0.030	20.5 ~23.0	0.5 ~2.5	8.0 ~10.0	0.20 ~1.0	17.0 ~200	Ba/B																
C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo	W	Fe	Ni																																							
0.05 ~0.15	<1.00	<1.00	<0.040	<0.030	20.5 ~23.0	0.5 ~2.5	8.0 ~10.0	0.20 ~1.0	17.0 ~200	Ba/B																																							
化学成分	(注) Sheet, Plate およびRod ともに化学成分は同じである。																																																
状態	Sheet, Plate およびRod のいずれもannealed (溶体化処理) とする。																																																
機械的性質	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">仕様板厚*</th><th colspan="2">0.2%耐力</th><th colspan="2">引張強さ</th><th colspan="2">伸び(%)**</th><th rowspan="2">硬さ (ロックウェルB)</th></tr> <tr> <th>in.</th><th>mm</th><th>psi</th><th>kg/mm<sup>2</sup></th><th>psi</th><th>kg/mm<sup>2</sup></th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Plate &gt;<math>\frac{3}{16}</math></td><td>&gt;4.762</td><td>&gt;35000</td><td>&gt;24.6</td><td>&gt;95000</td><td>&gt;668</td><td>&gt;40</td><td>&lt;B 100</td></tr> <tr> <td>Sheet 0.020 ~<math>\frac{3}{16}</math></td><td>0.508 ~4.761</td><td>&gt;40000</td><td>&gt;28.1</td><td>&gt;100000</td><td>&gt;70.3</td><td>&gt;35</td><td>&lt;B 100</td></tr> <tr> <td>Rod</td><td>-</td><td>&gt;35000</td><td>&gt;24.6</td><td>&gt;95000</td><td>&gt;66.8</td><td>&gt;35</td><td>-</td></tr> </tbody> </table>											仕様板厚*	0.2%耐力		引張強さ		伸び(%)**		硬さ (ロックウェルB)	in.	mm	psi	kg/mm <sup>2</sup>	psi	kg/mm <sup>2</sup>	Plate > $\frac{3}{16}$	>4.762	>35000	>24.6	>95000	>668	>40	<B 100	Sheet 0.020 ~ $\frac{3}{16}$	0.508 ~4.761	>40000	>28.1	>100000	>70.3	>35	<B 100	Rod	-	>35000	>24.6	>95000	>66.8	>35	-
仕様板厚*	0.2%耐力		引張強さ		伸び(%)**		硬さ (ロックウェルB)																																										
	in.	mm	psi	kg/mm <sup>2</sup>	psi	kg/mm <sup>2</sup>																																											
Plate > $\frac{3}{16}$	>4.762	>35000	>24.6	>95000	>668	>40	<B 100																																										
Sheet 0.020 ~ $\frac{3}{16}$	0.508 ~4.761	>40000	>28.1	>100000	>70.3	>35	<B 100																																										
Rod	-	>35000	>24.6	>95000	>66.8	>35	-																																										
	(注) * Plate とは板厚が4.762mm以上のものを言い、Sheetは4.761mm以下を言う。 ** Rod の場合、ゲージ長4Dという規定も加わる。																																																
その他	Sheetでは、下記のような結晶粒度に関する規定がある。																																																
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>板厚 in (mm)</th><th>結晶粒度</th><th>平均結晶粒径 in (mm)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.125 (3.175) 以下</td><td>&lt; 3.0</td><td>&lt; 0.0050 (0.127)</td></tr> <tr> <td>0.125 (3.175) 以上</td><td>&lt; 1.5</td><td>&lt; 0.0084 (0.214)</td></tr> </tbody> </table>											板厚 in (mm)	結晶粒度	平均結晶粒径 in (mm)	0.125 (3.175) 以下	< 3.0	< 0.0050 (0.127)	0.125 (3.175) 以上	< 1.5	< 0.0084 (0.214)																													
板厚 in (mm)	結晶粒度	平均結晶粒径 in (mm)																																															
0.125 (3.175) 以下	< 3.0	< 0.0050 (0.127)																																															
0.125 (3.175) 以上	< 1.5	< 0.0084 (0.214)																																															
	(注) ハステロイXに関する規格としては、上記のASTMの他にAMS (Aerospace Material Specification) 5536G (Sheet& Plate) およびAMS 5754 G (Bar, Forging & Ring) があるが、重複するので省略する。																																																

表4 ハステロイ-XのFs値

温 度 (°C)	応 力 (kg/mm <sup>2</sup> )	Fs 値	備 考
1066°C	2.81	$\frac{2.2}{7.3} = 0.30$	図26(a)
	1.71	$\frac{3.1}{3.56} = 0.87$	
1149°C	0.92	$\frac{7}{21} = 0.33$	図26(b)
	0.35	$\frac{101}{115} = 0.88$	
900°C	2.4	$\frac{2110}{5431} = 0.39$	文献(36, 37) 参照
	4.8	$\frac{128}{234} = 0.55$	
	3.4	$\frac{1240}{2574} = 0.48$	
1000°C	3.5	$\frac{240}{445} = 0.54$	図26(c)
	2.3	$\frac{1800}{3279} = 0.55$	
		平均 0.543	

$$Fs = \frac{\text{3次クリープ発生時間}}{\text{破断時間}}$$



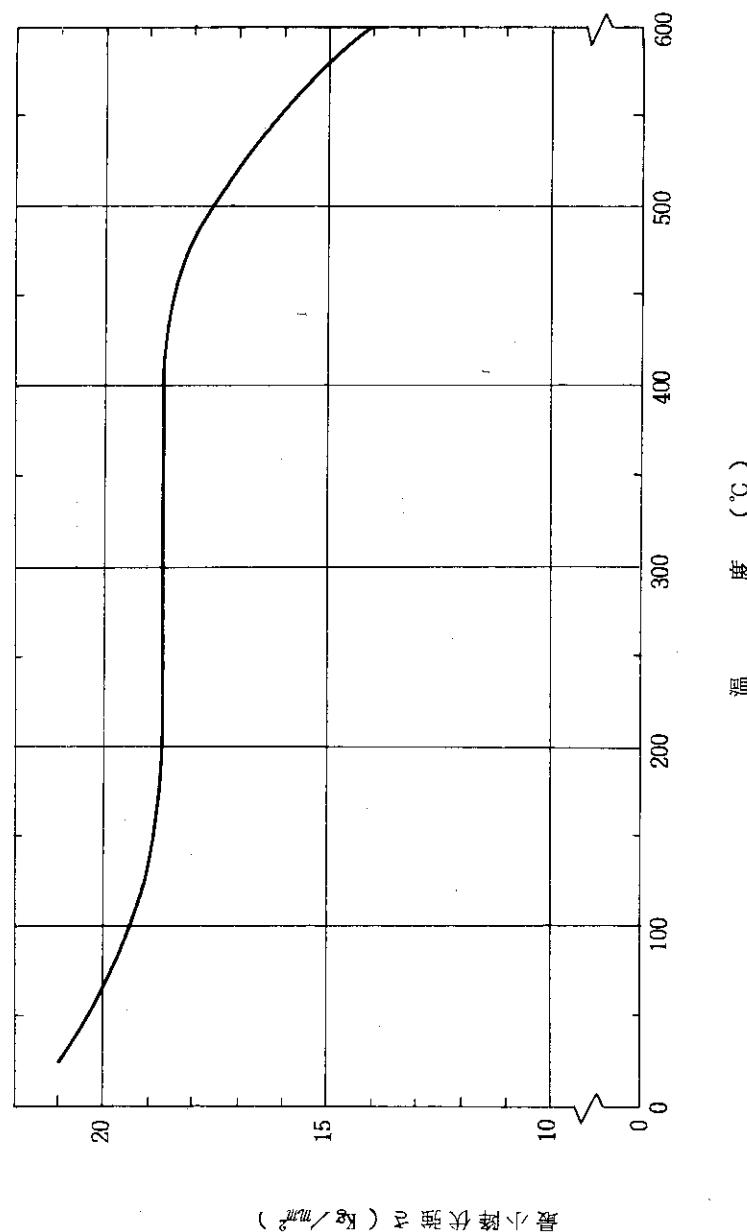


図1 2 1/4 Cr-1Mo鋼の最小降伏強さ

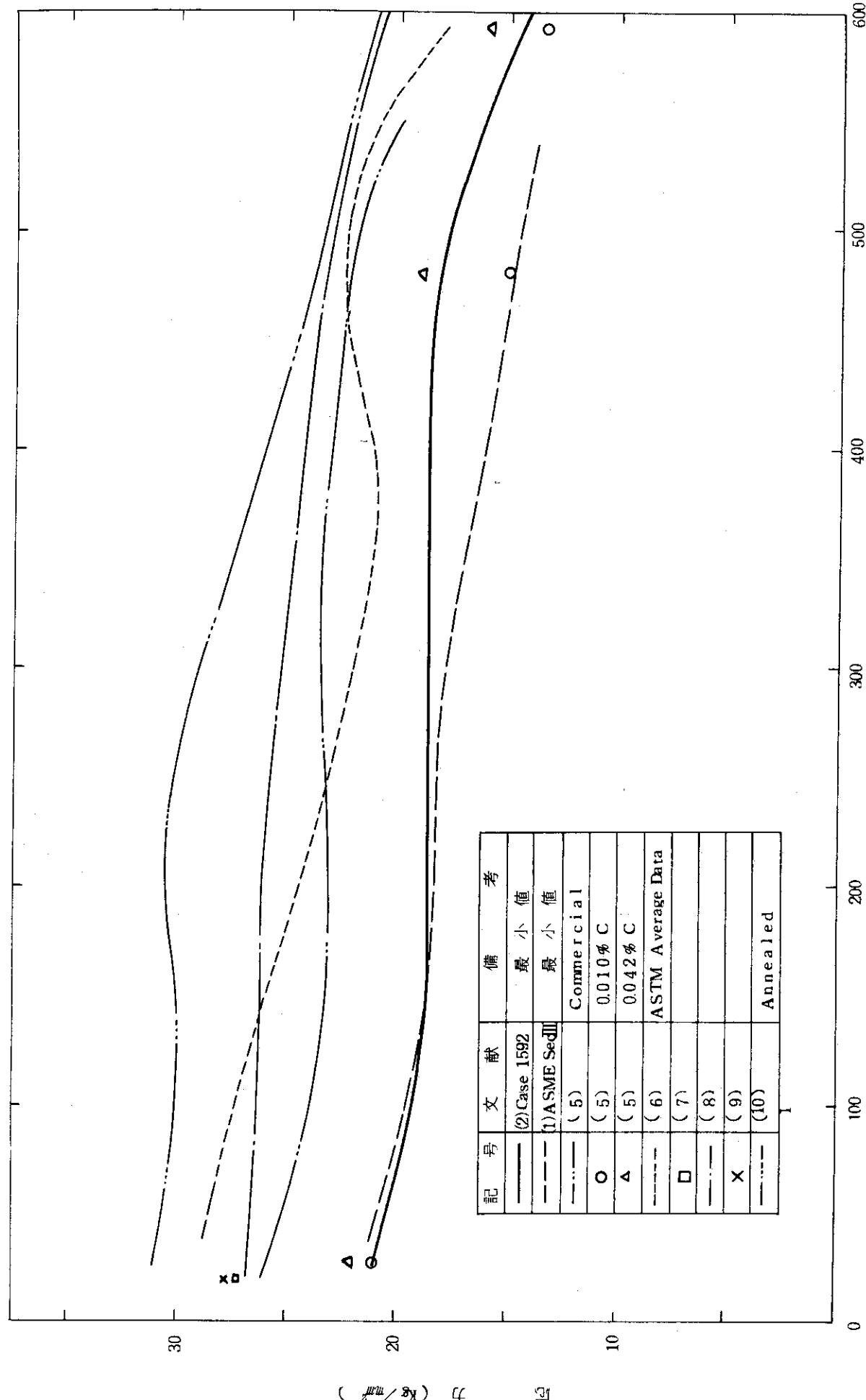


図 2 2 1/4 Cr-1Mo 鋼の降伏強さ

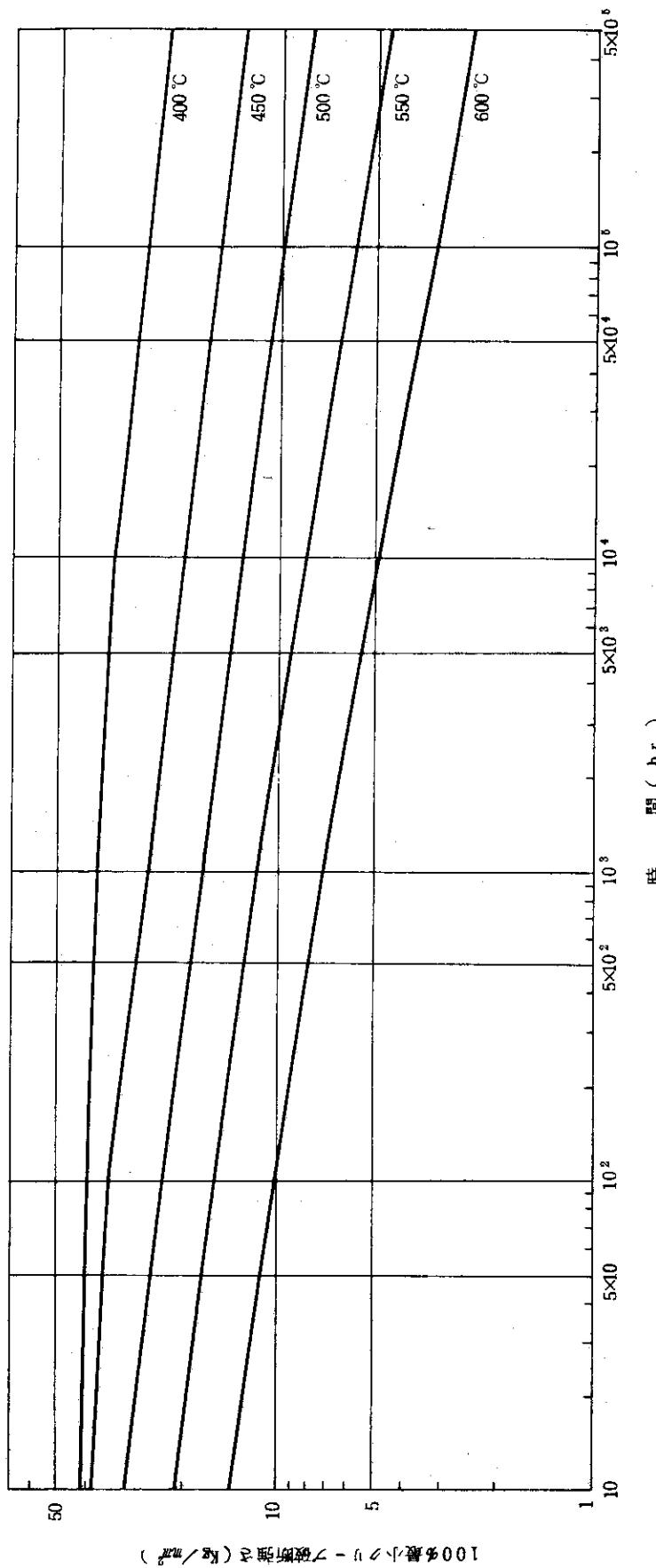


図3 2 1/4Cr-1Mo鋼の100%最小クリープ破断強さ

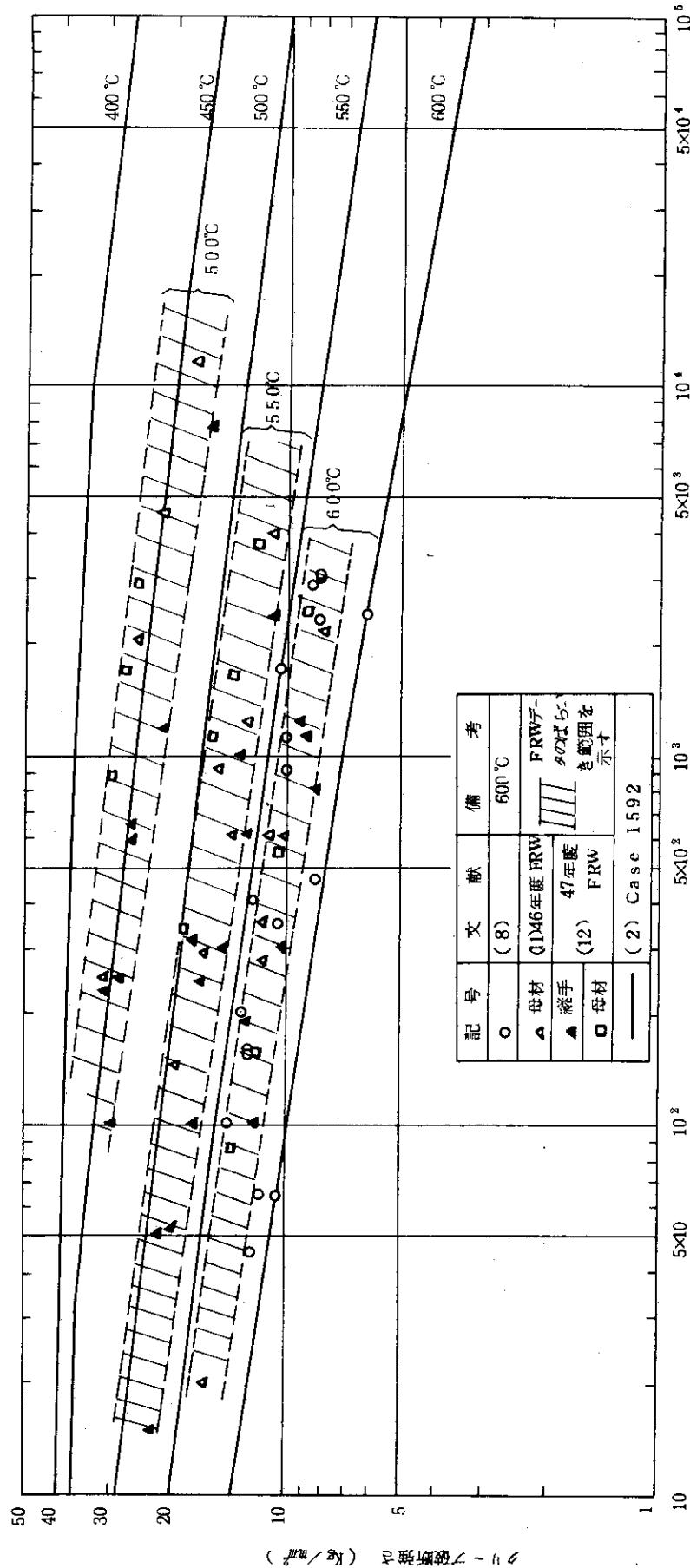


図 4 2  $\frac{1}{4}$  Cr-1 Mo鋼のクリープ破断強さ

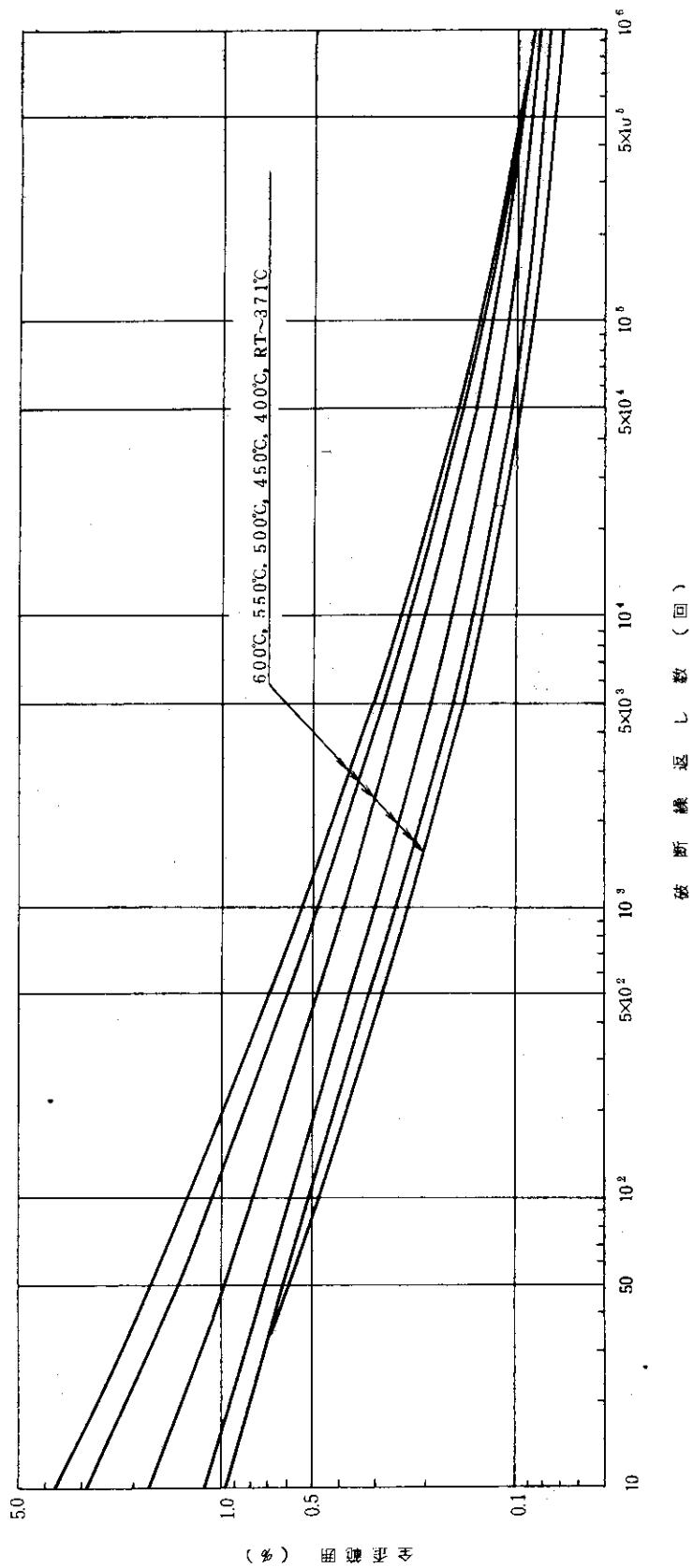


図 5 2 1/4Cr-1Mo 鋼の設計疲労曲線

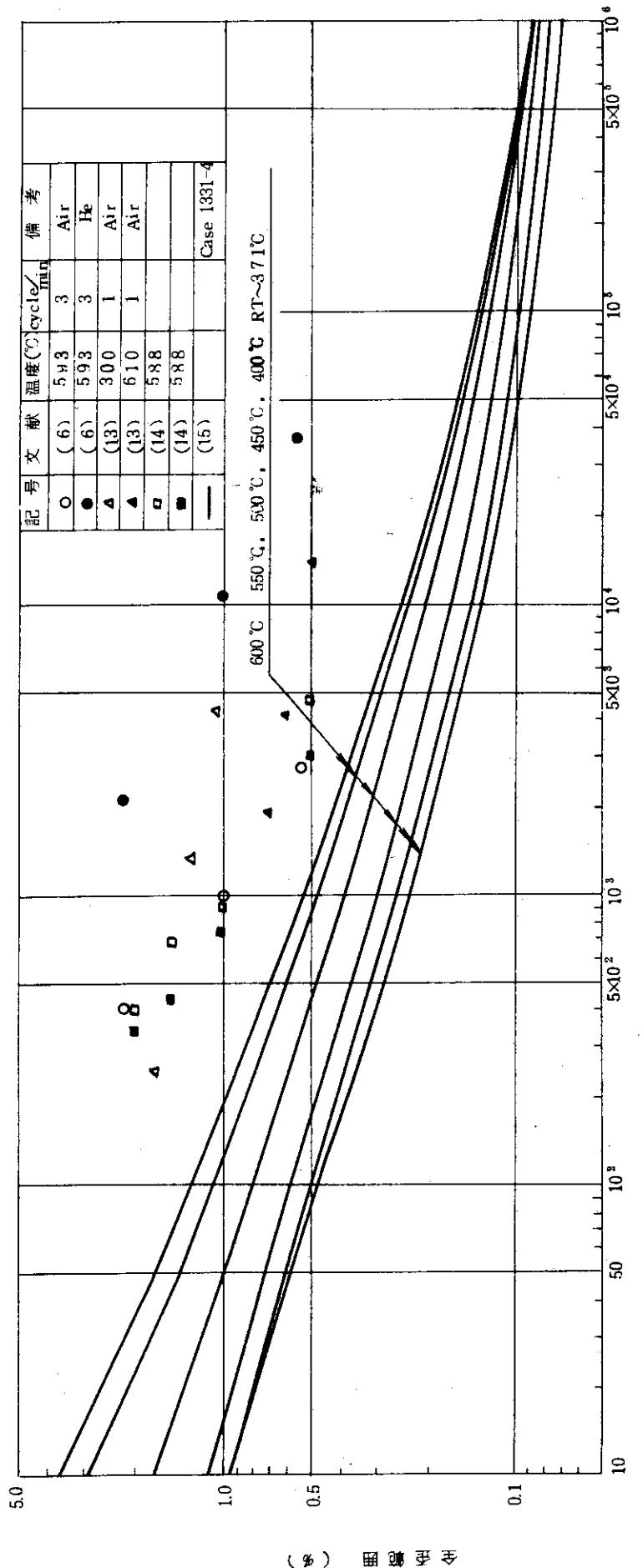
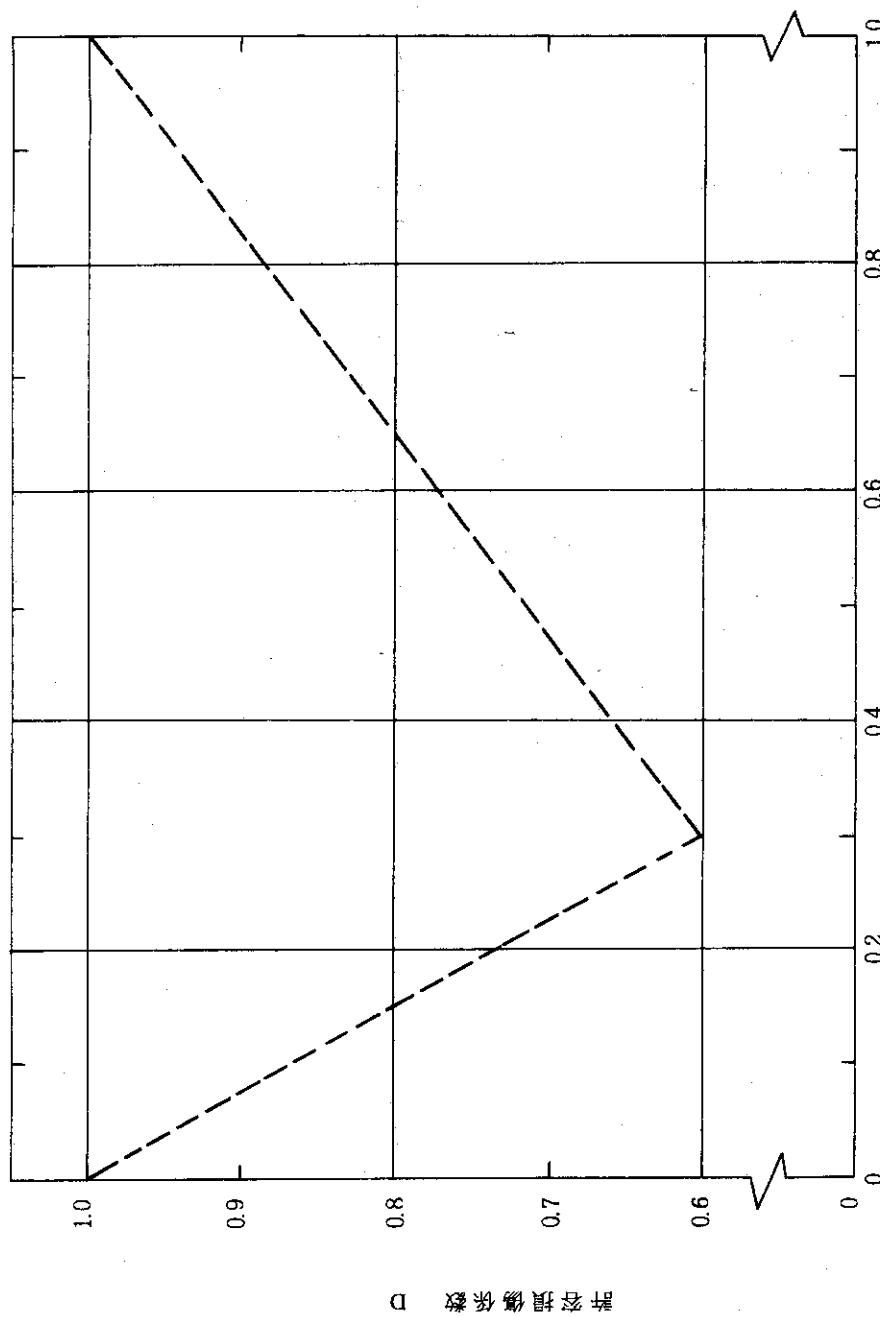
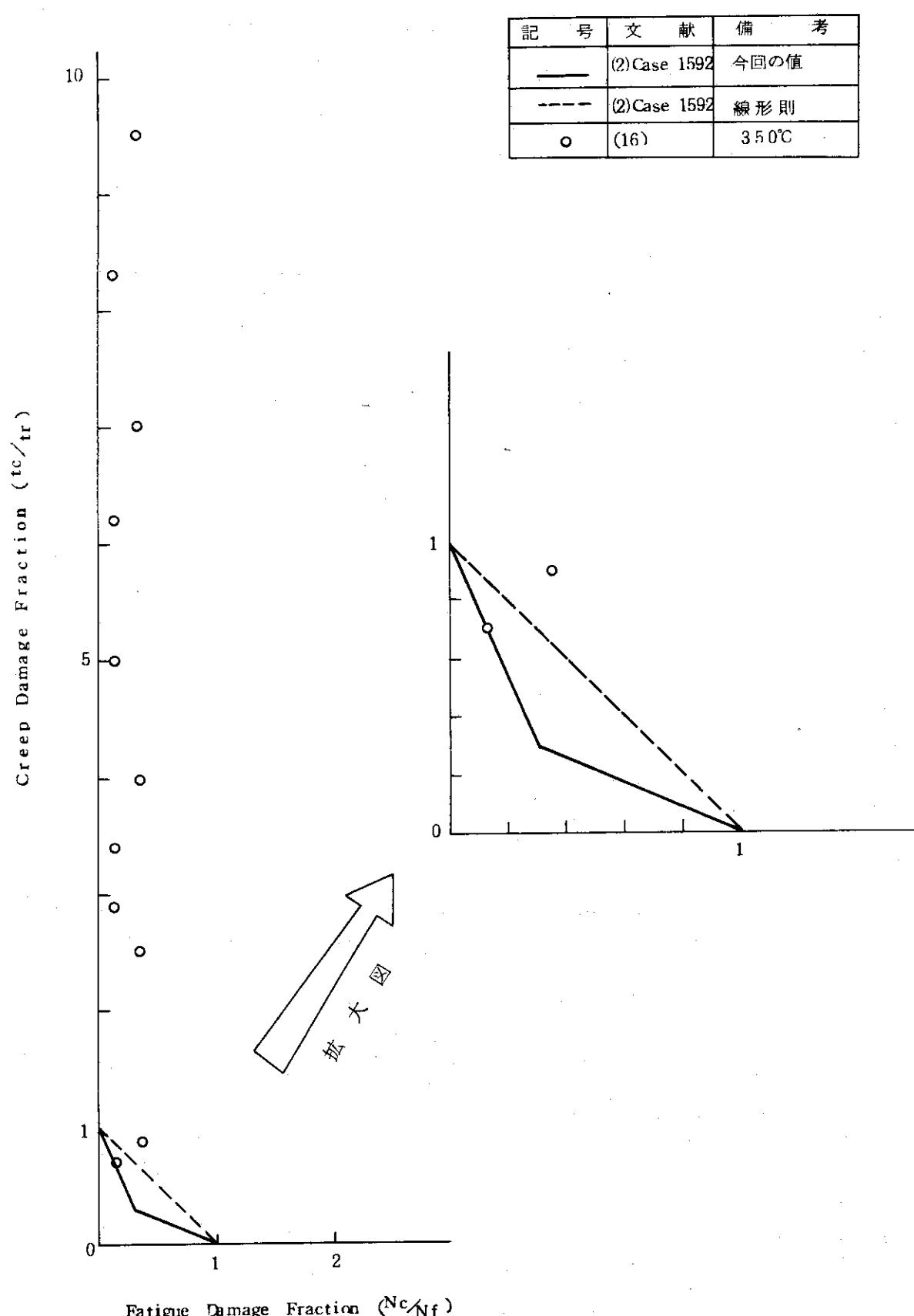


図 6 2 1/4 Cr-1Mo 鋼の疲れ強さ



$$\Sigma \frac{n}{N_d} \text{ あるいは } \Sigma \frac{t}{T_d}$$

図 7  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼のクリープ疲労の重複効果の許容損傷係数 D

図8  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼のクリープ疲れの重畠効果

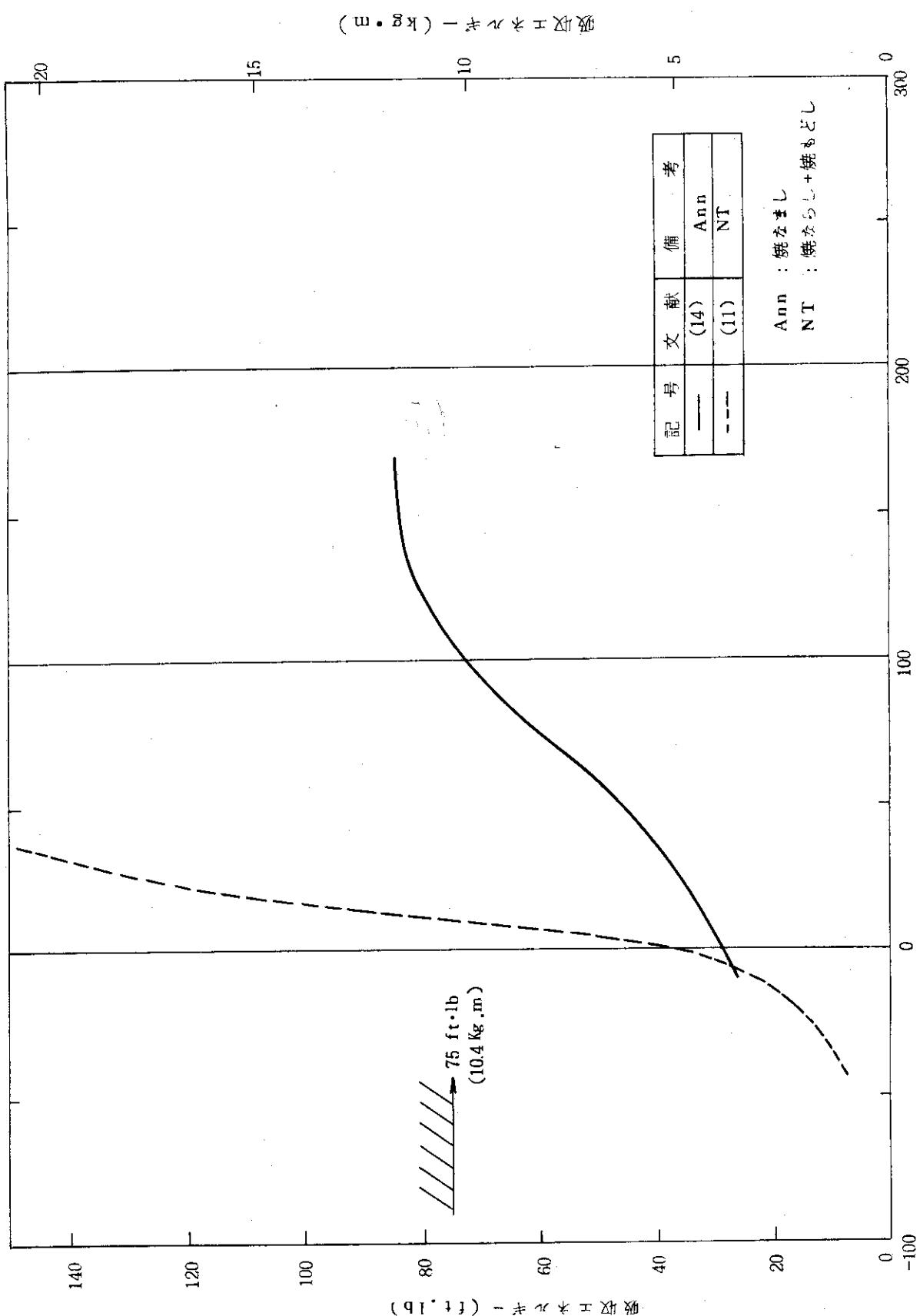


図 9 2 1/4 Cr-1Mo 鋼の切欠靱性

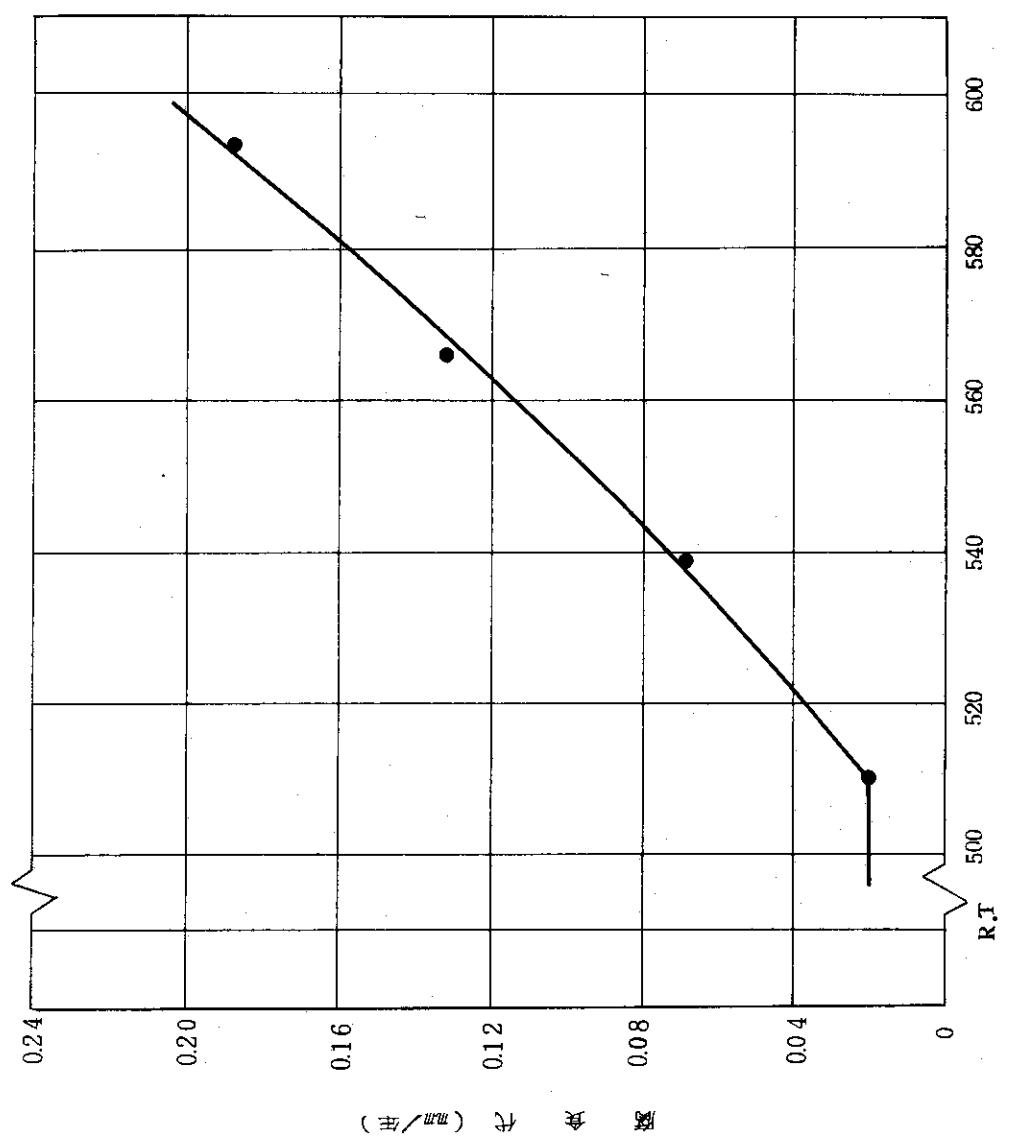


図10 2 1/4 Cr-1Mo鋼の空気中における腐食代 (Goldmann<sup>10</sup>による)

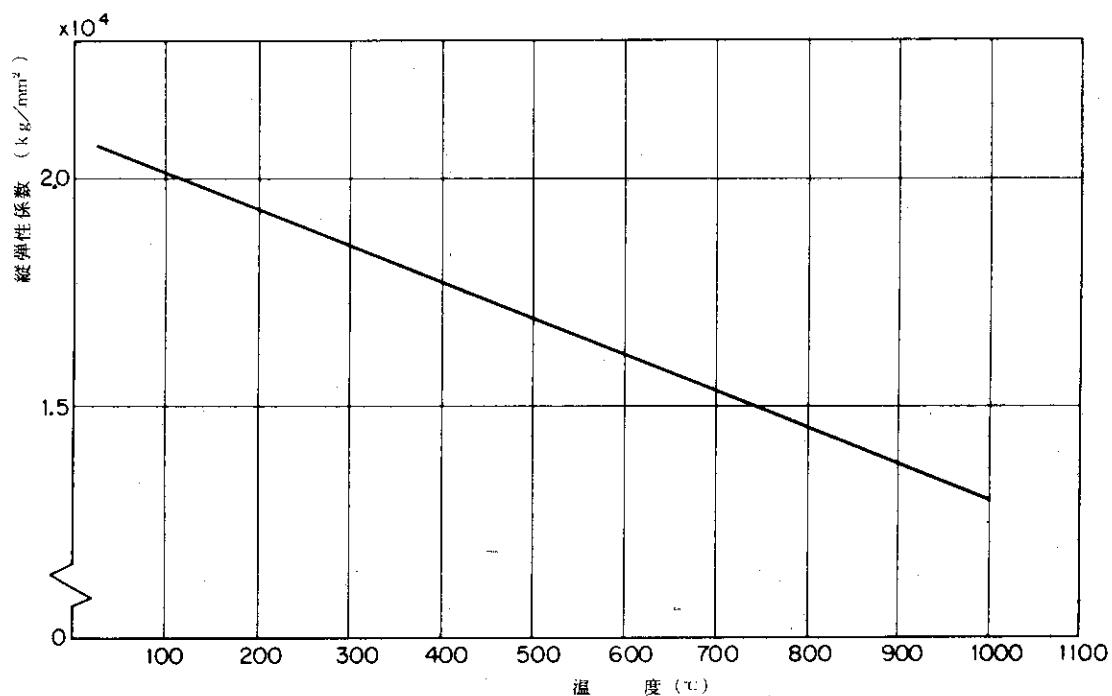


図1.1 ハステロイ-Xの縦弾性係数

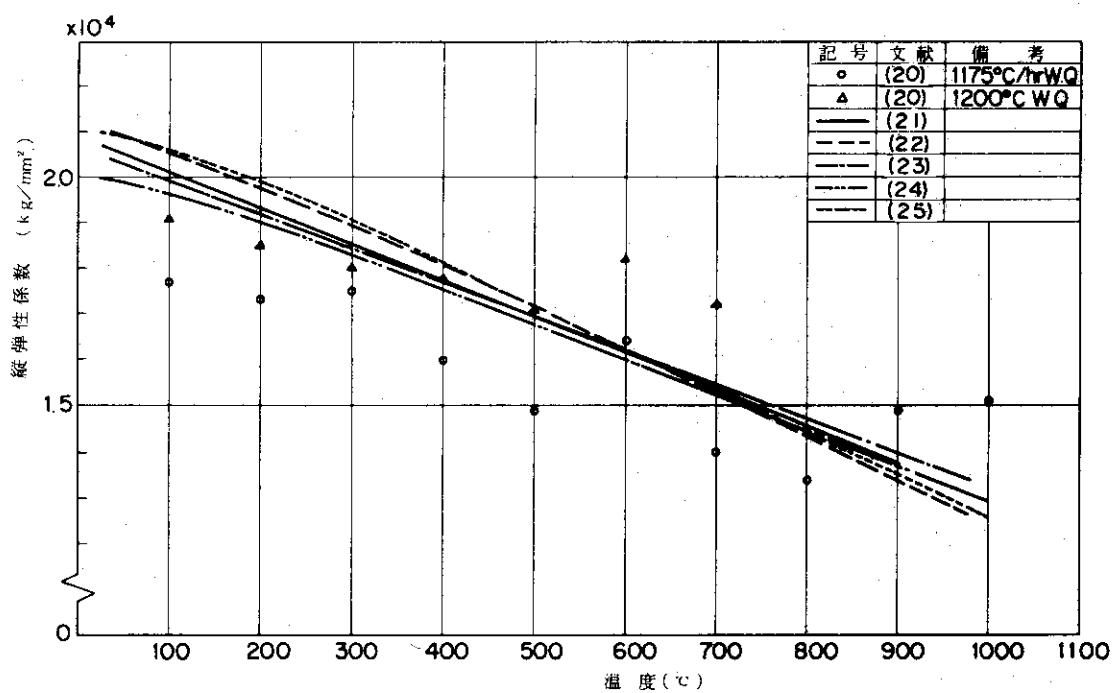


図1.2 ハステロイ-Xの縦弾性係数

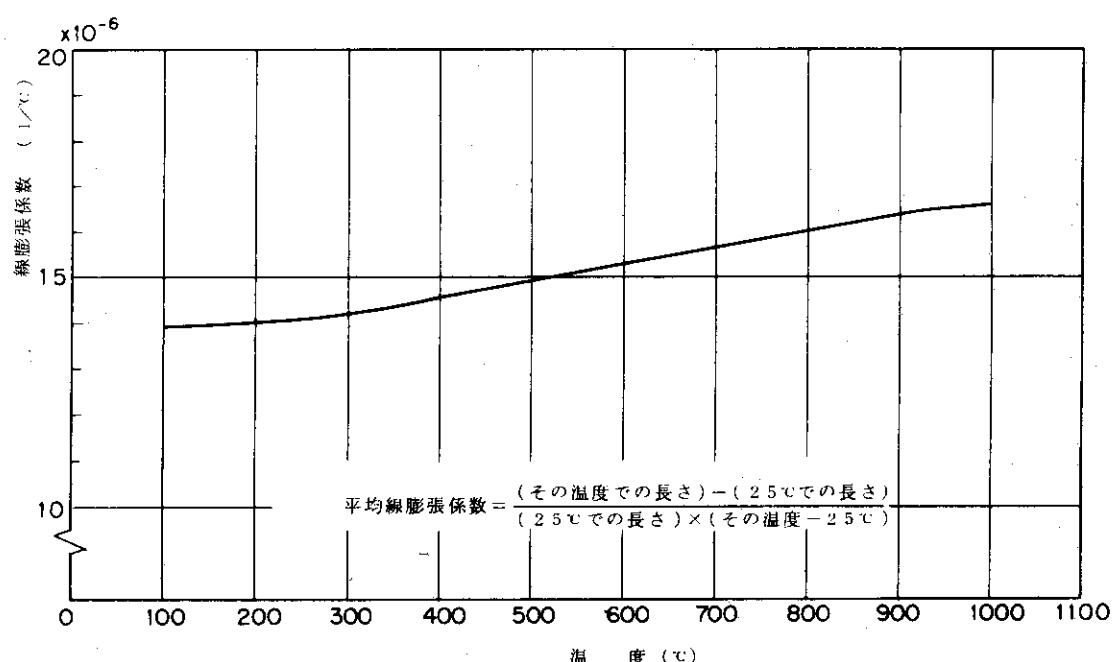


図 1.3 ハステロイーXの平均線膨張係数

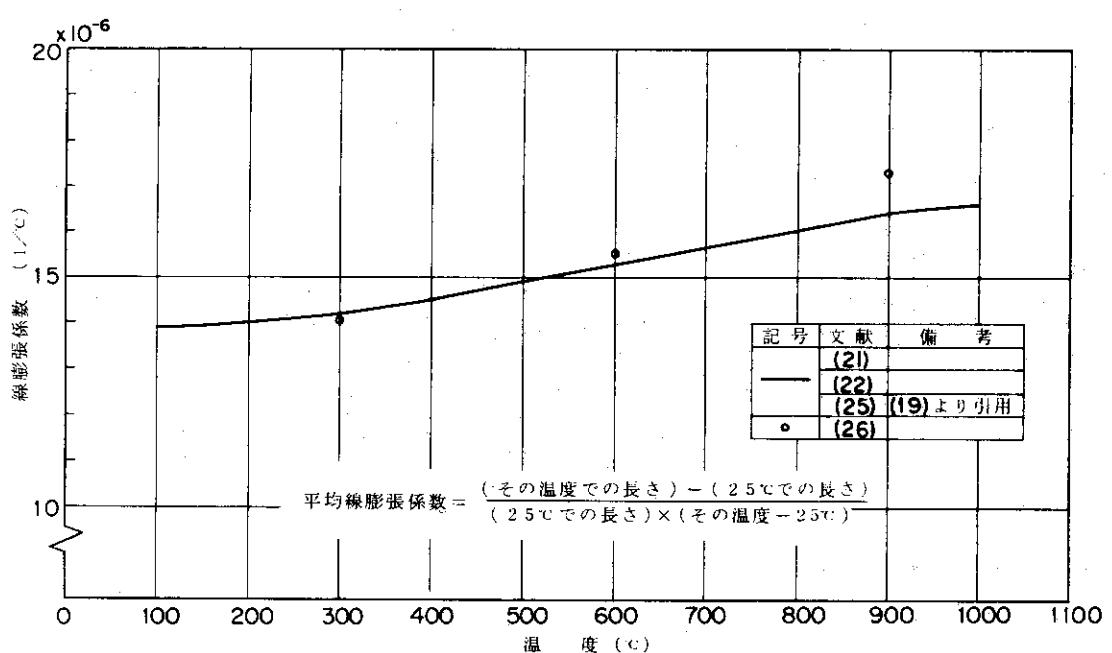


図 1.4 ハステロイーXの平均線膨張係数

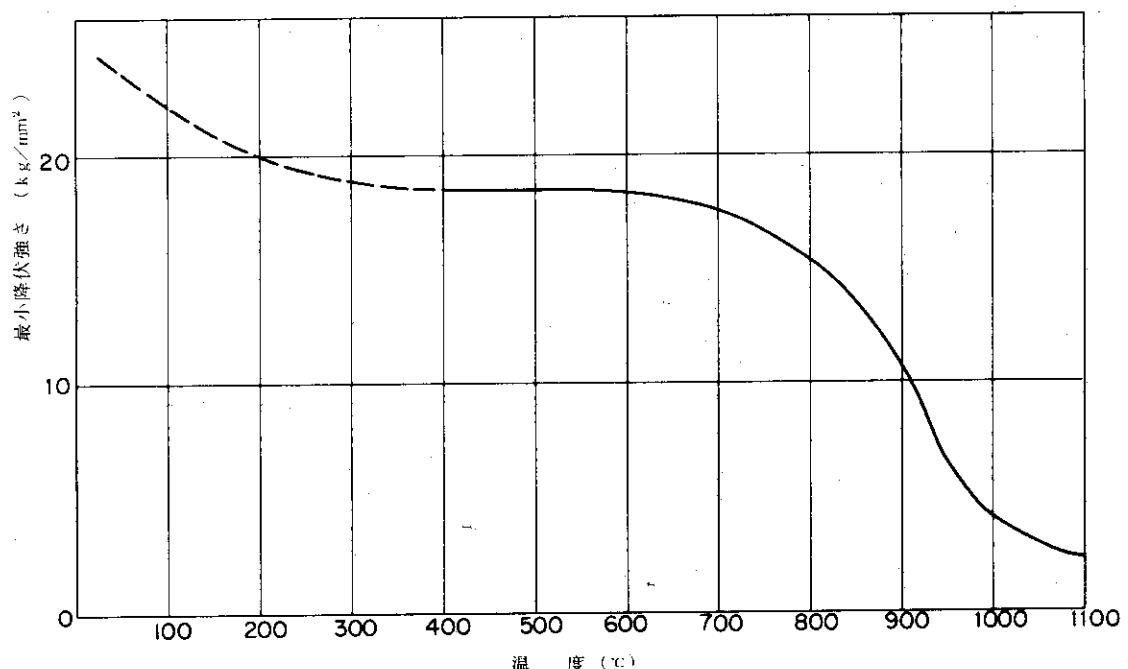
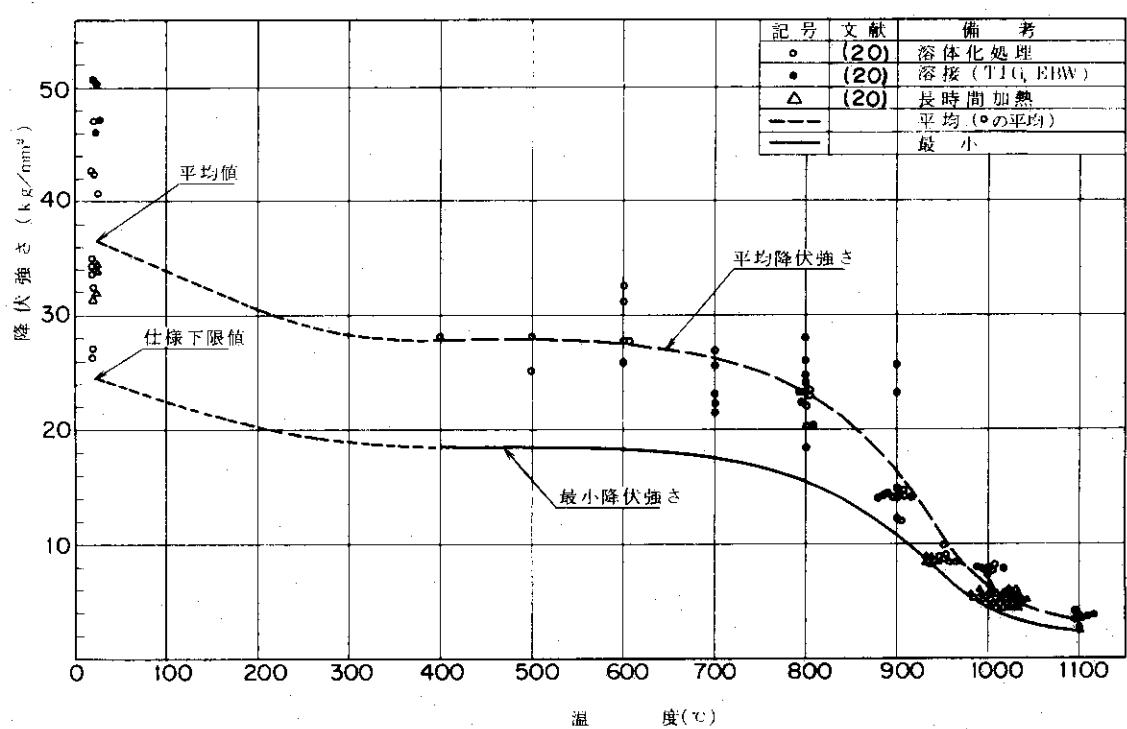
図 1.5 ハステロイ-X の最小降伏強さ ( $S_y$ )

図 1.6 ハステロイ-X の降伏強さ (1)

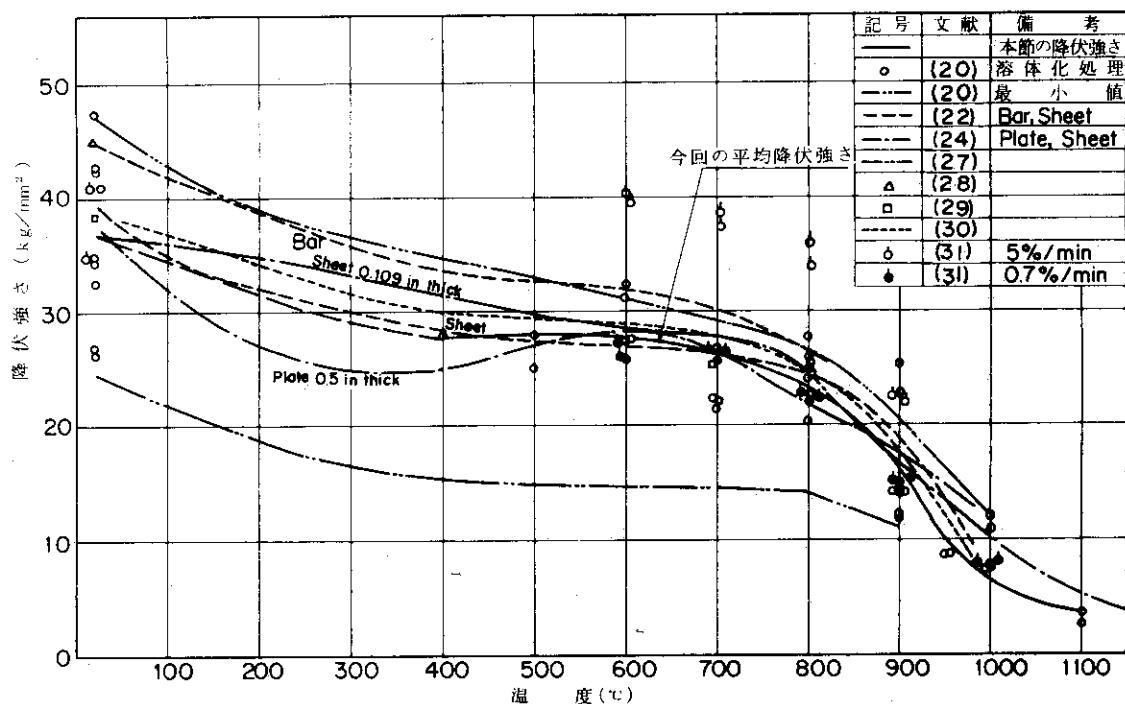


図 17 ハステロイ-X の降伏強さ (2)

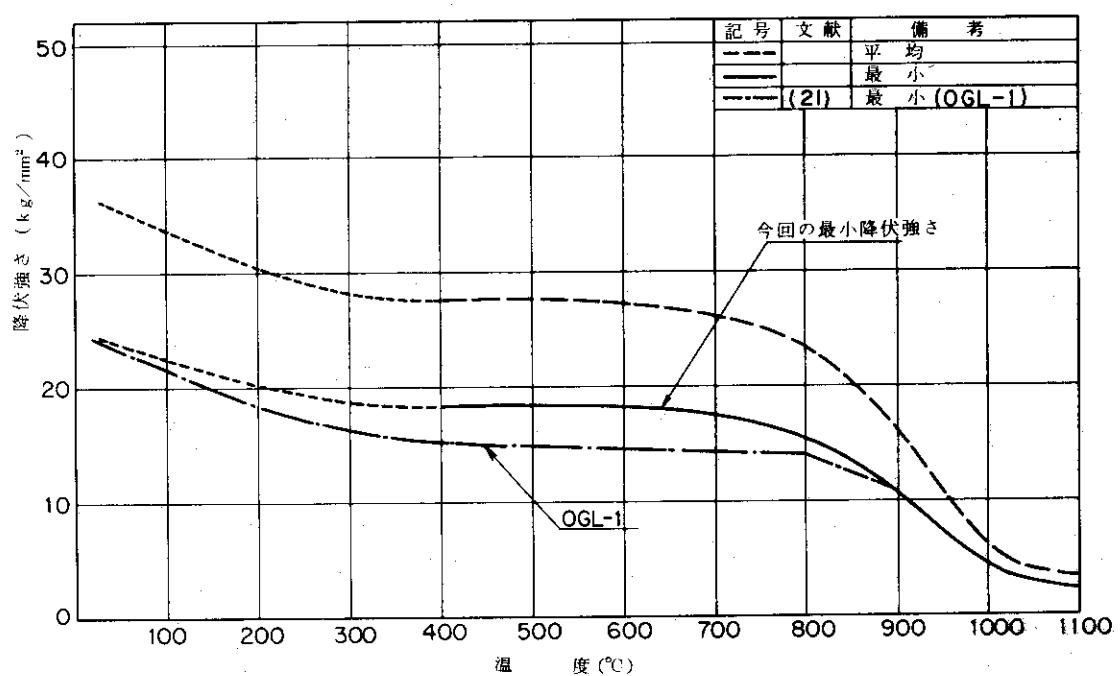


図 18 ハステロイ-X の降伏強さ (3)

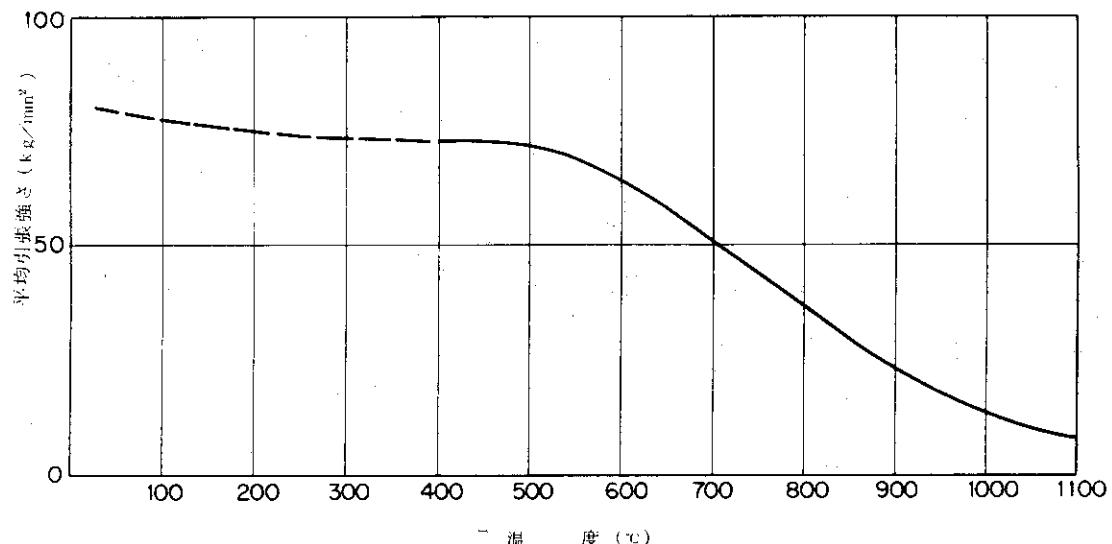


図 19 ハステロイ-X の平均引張強さ

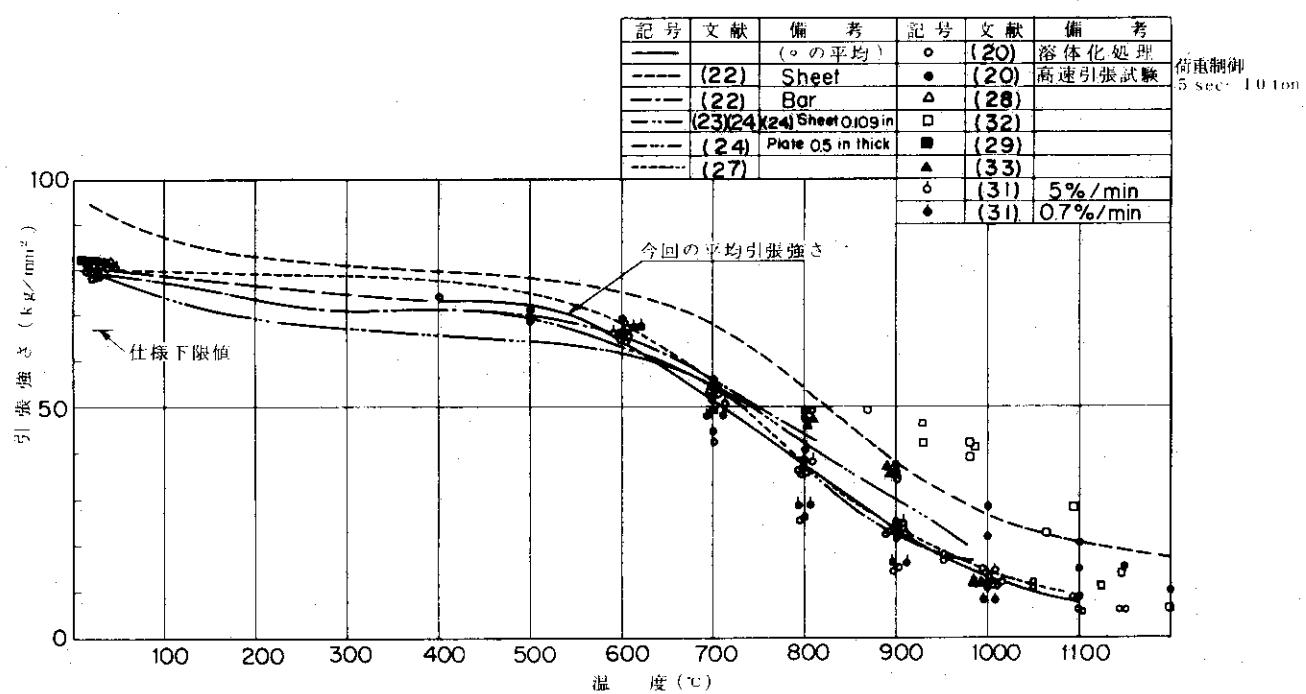
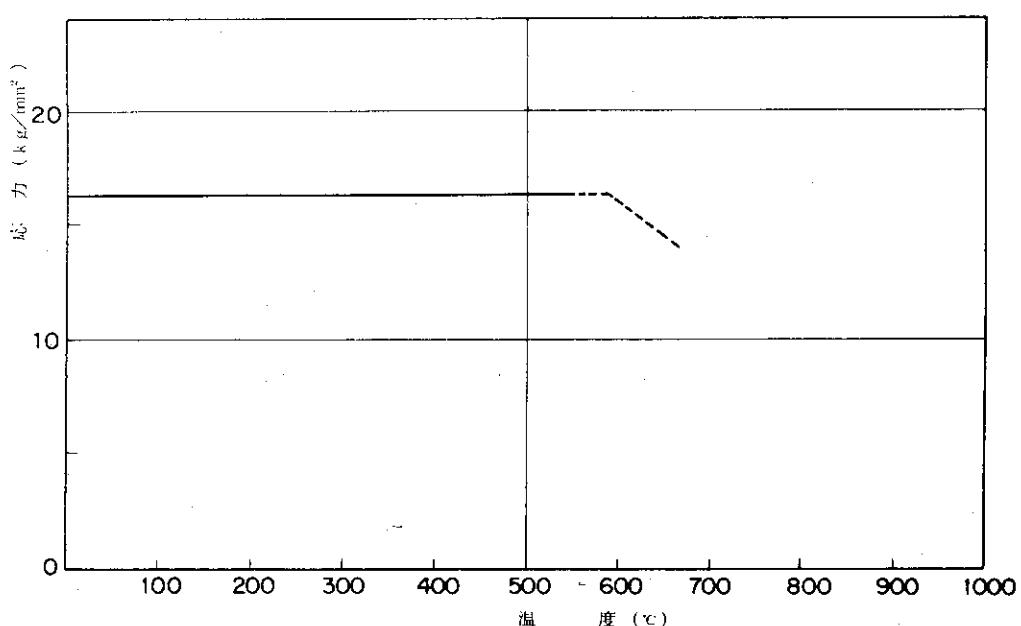
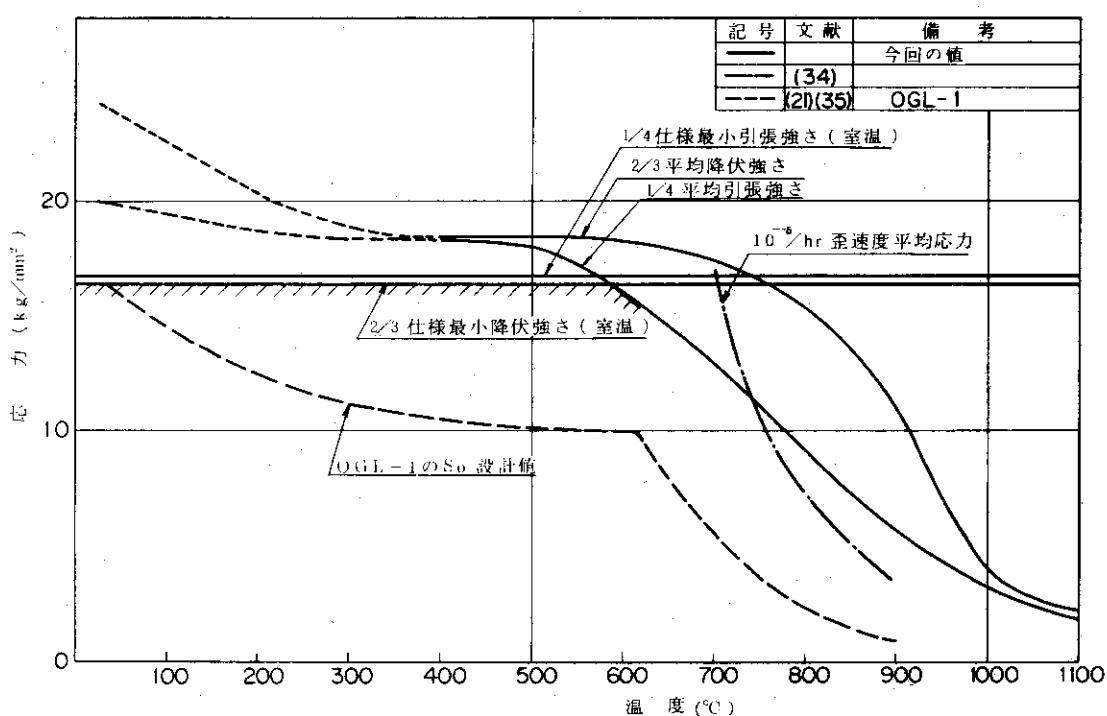


図 20 ハステロイ-X の引張強さ

図 2.1 ハステロイ-X の  $S_o$ 図 2.2 ハステロイ-X の  $S_o$  曲線

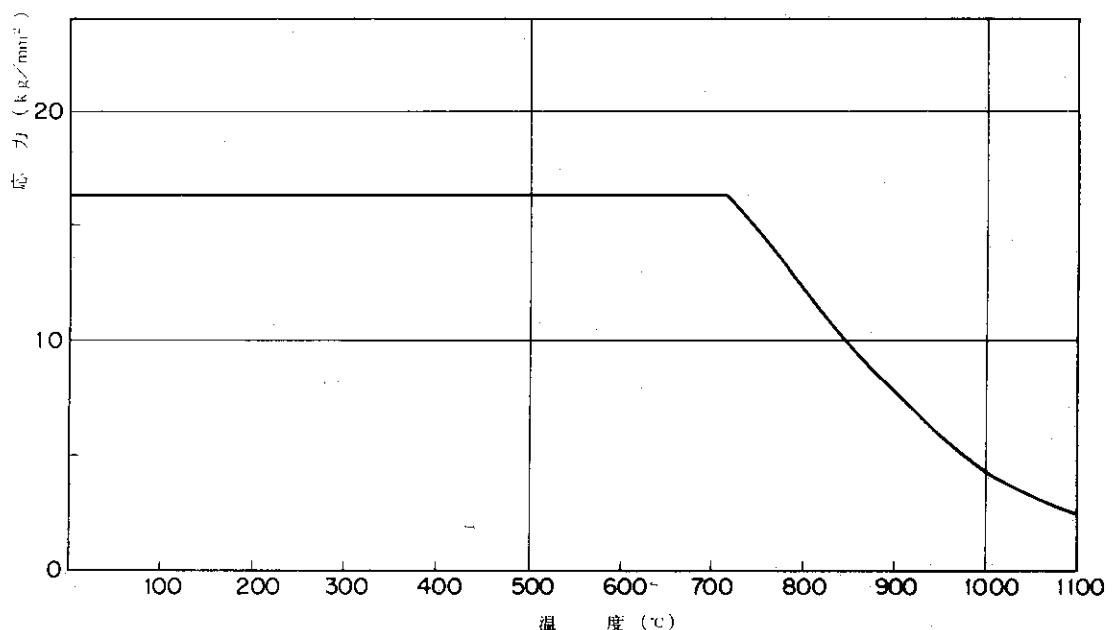


図 2.3 ハステロイ-X の Sm 曲線

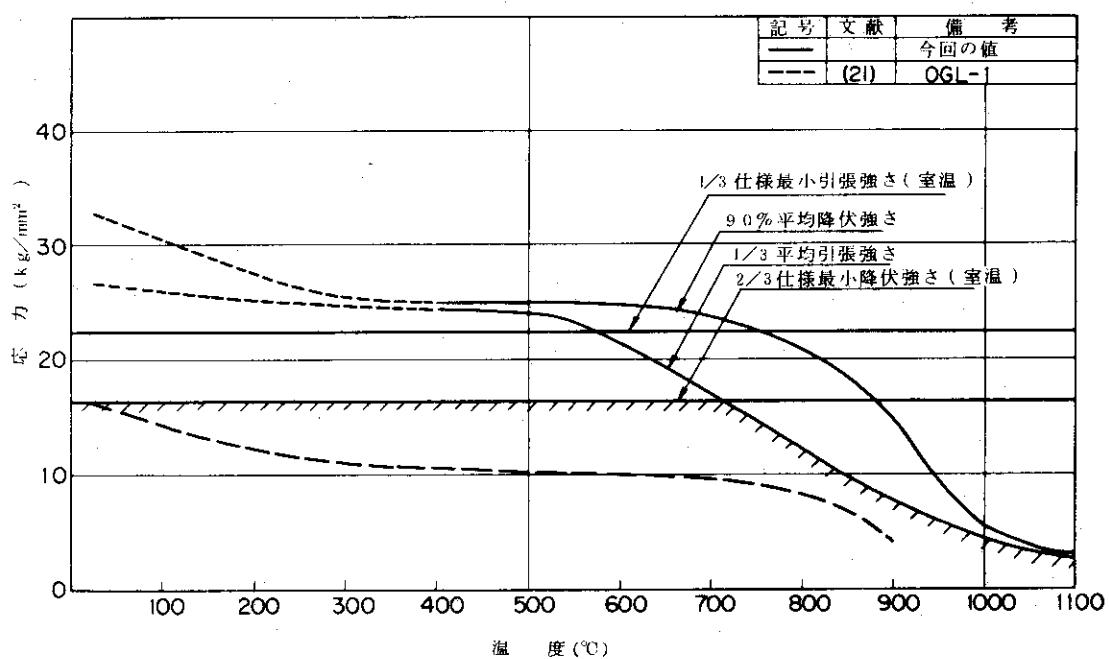


図 2.4 ハステロイ-X の Sm 曲線

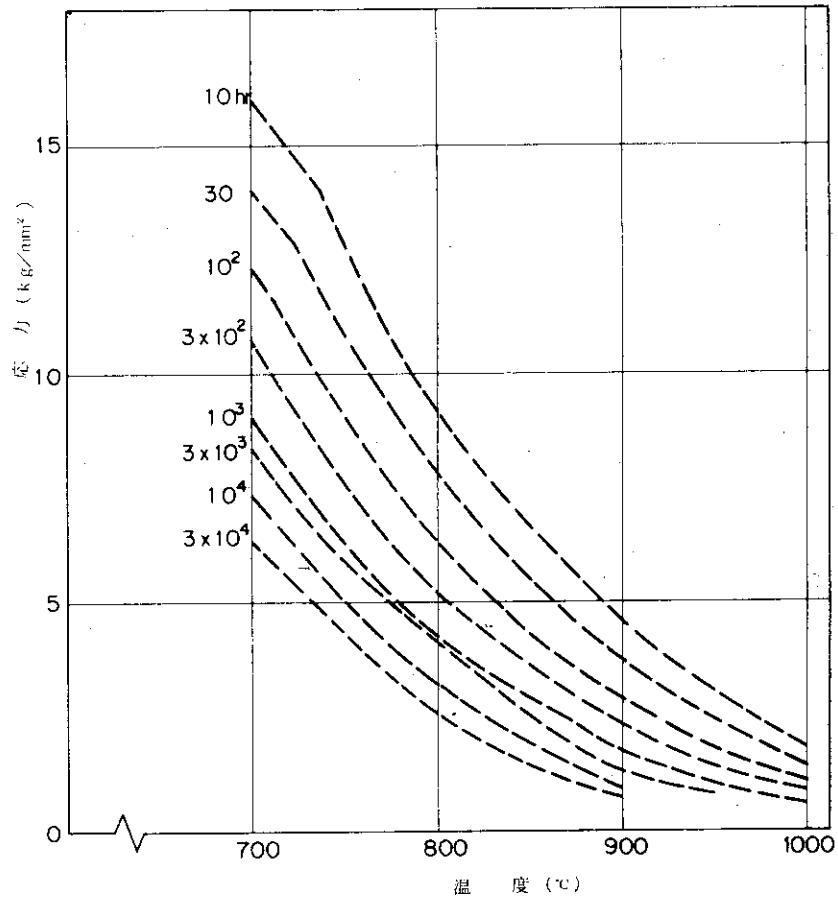


図 2.5 ハステロイ-X の St 曲線

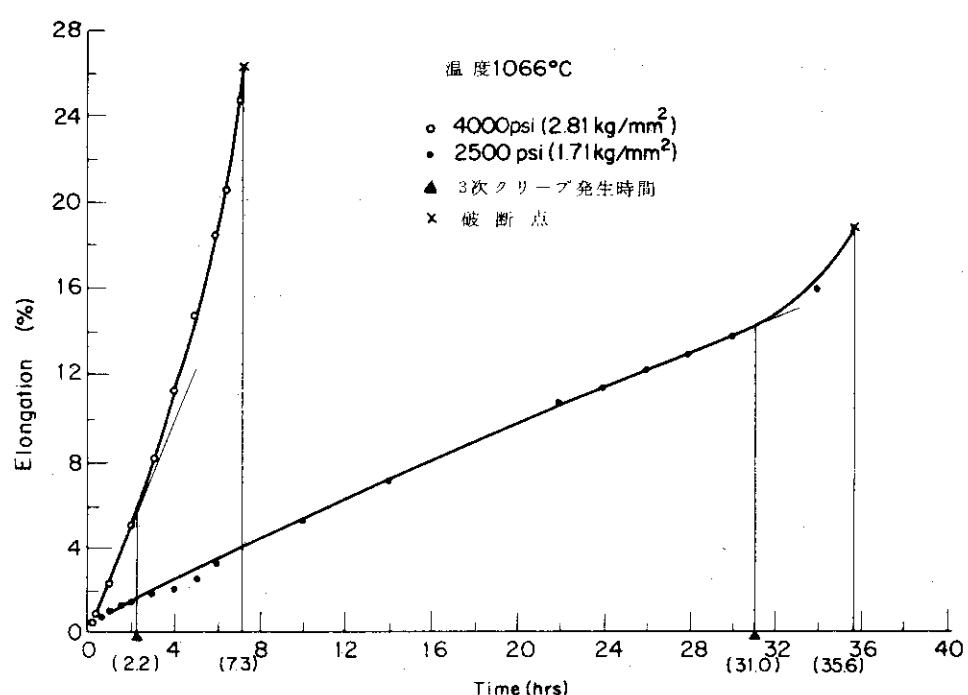


図 2.6(a) ハステロイ-X のクリープ曲線(文献(34))

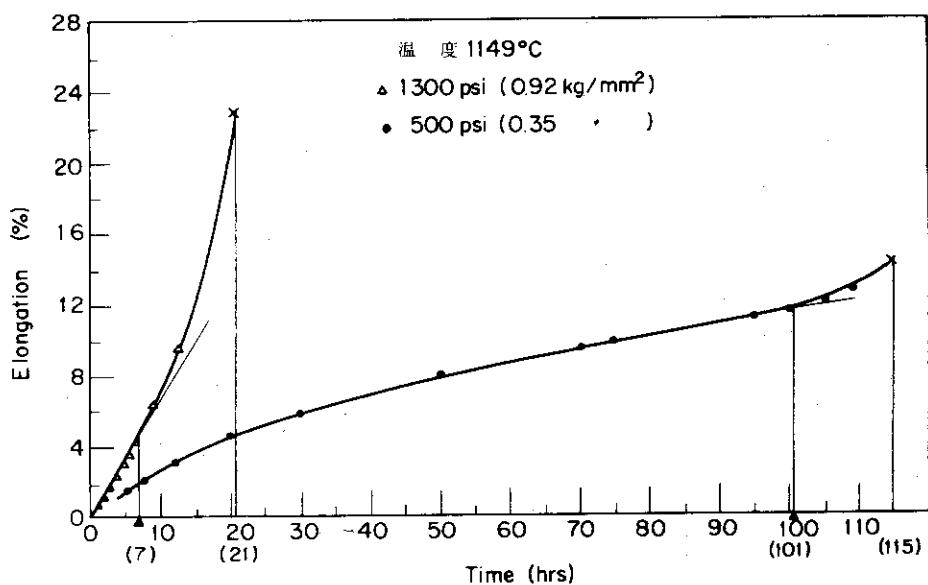


図 2 6 (b) ハステロイーXのクリープ曲線（文献（34））

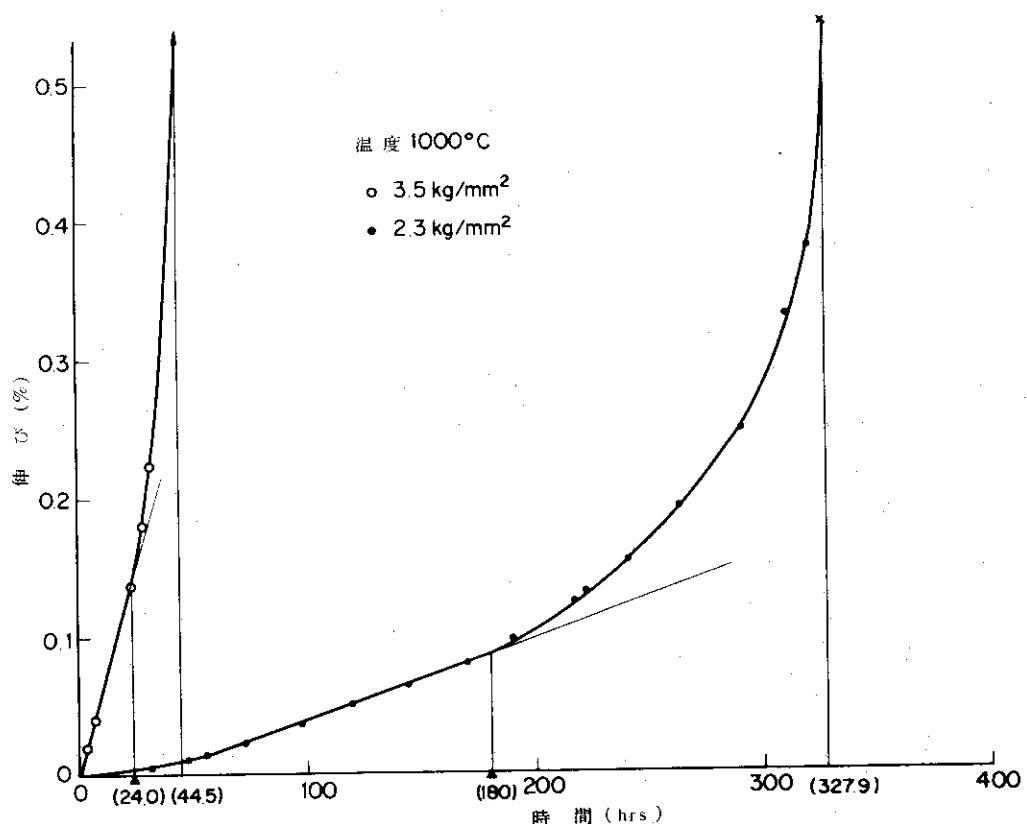


図 2 6 (c) ハステロイーXのクリープ曲線（文献（38））

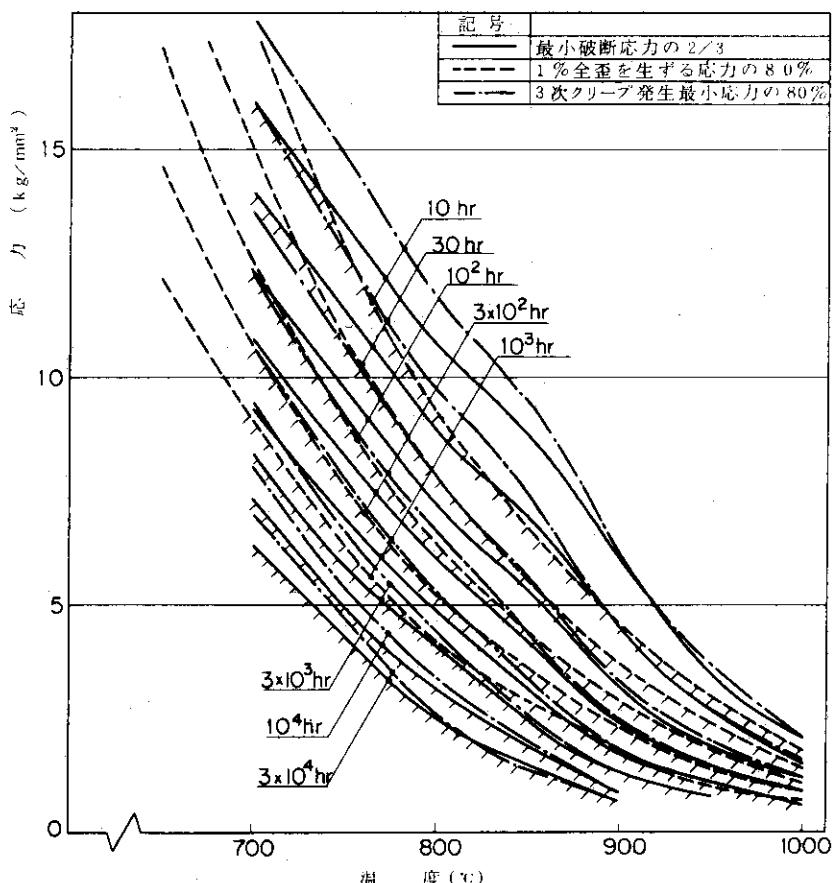


図 27 ハステロイ - X の St 曲線

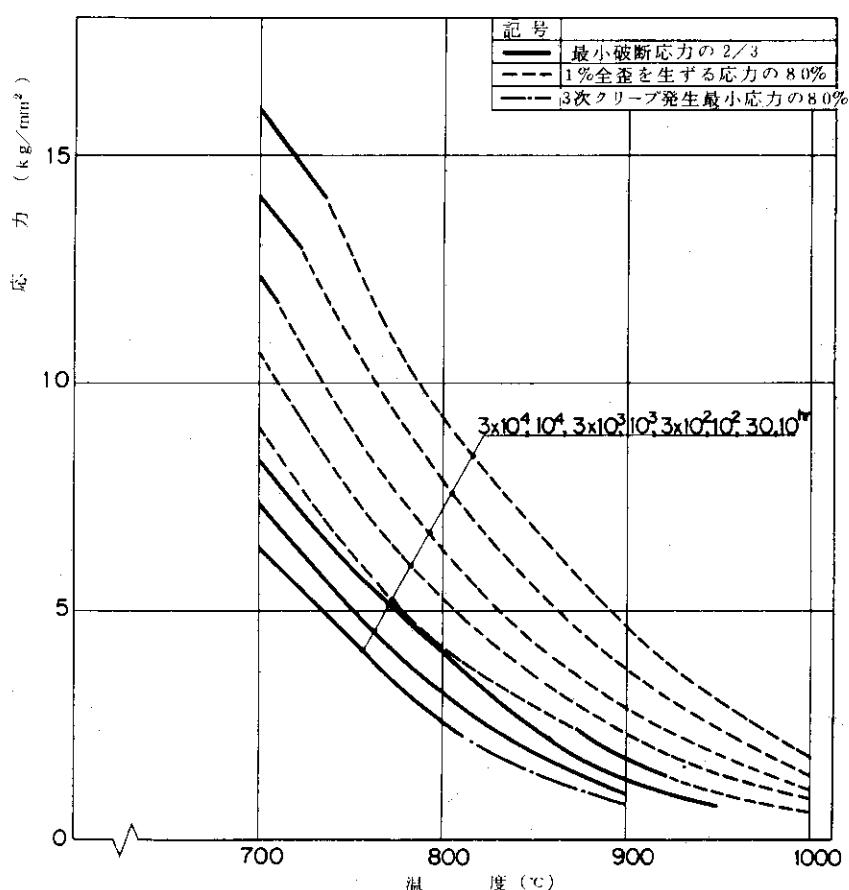


図 28 ハステロイ - X の St 曲線  
 (但し、 $3 \times 10^4, 10^4, 3 \times 10^3$  hr について、1%全歪を生ずる応力を考慮せず。  
 $10^3$  hr,  $950^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$  は、3次クリープ発生応力を考慮せず。)

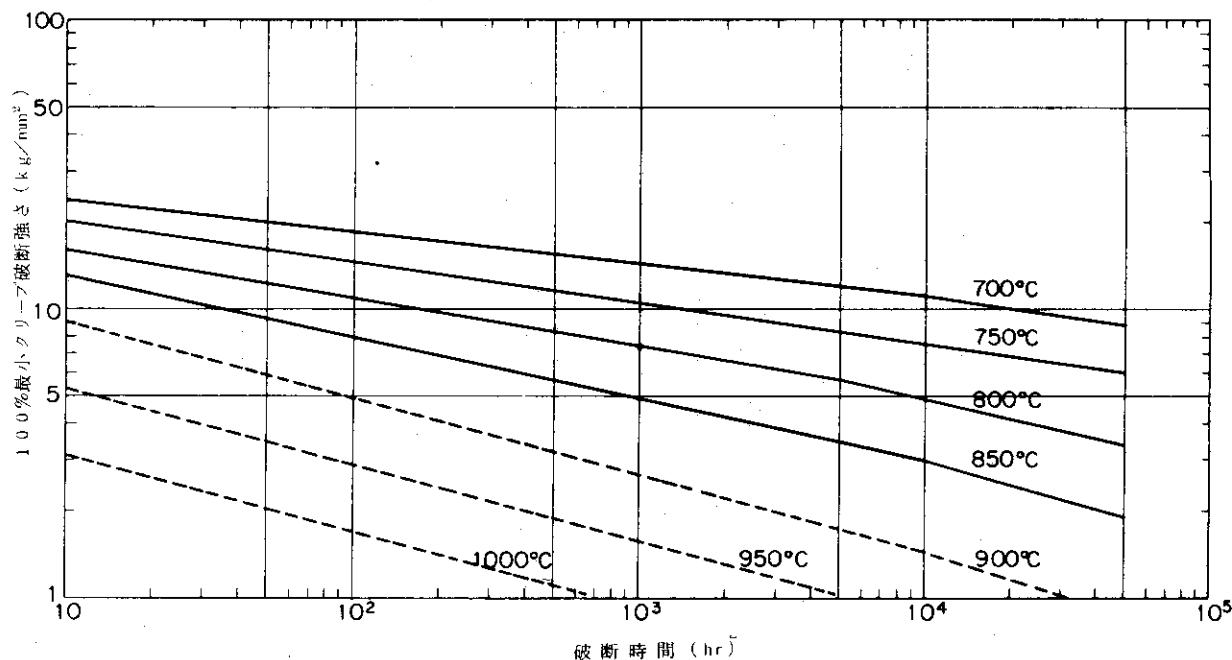


図 29 ハステロイ-X の 100% 最小クリープ破断強さ

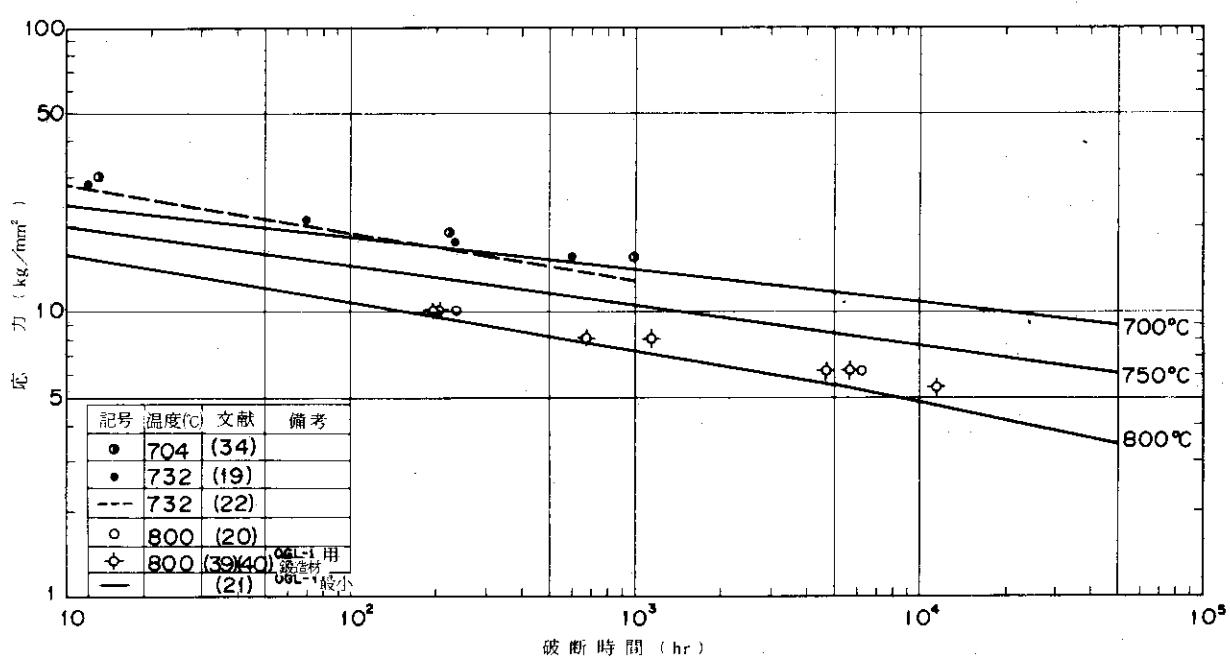


図 30 700~800°Cにおけるハステロイ-Xのクリープ破断強さ

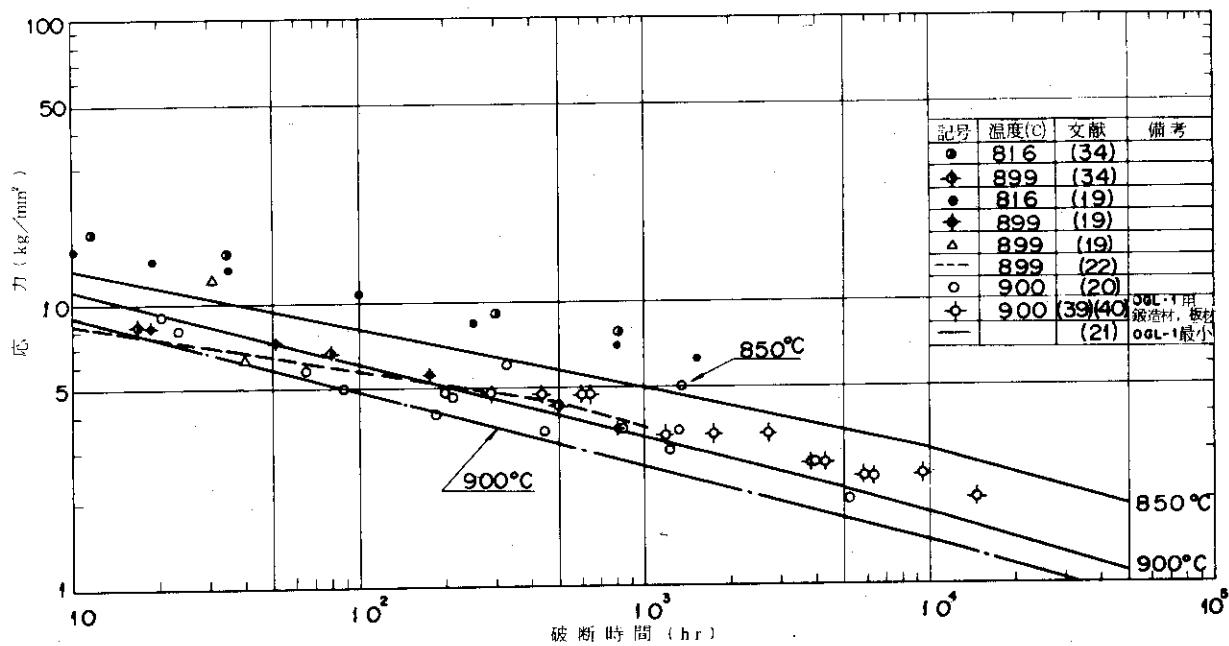


図 3 1 800~900°Cにおけるハステロイ-Xのクリープ破断強さ

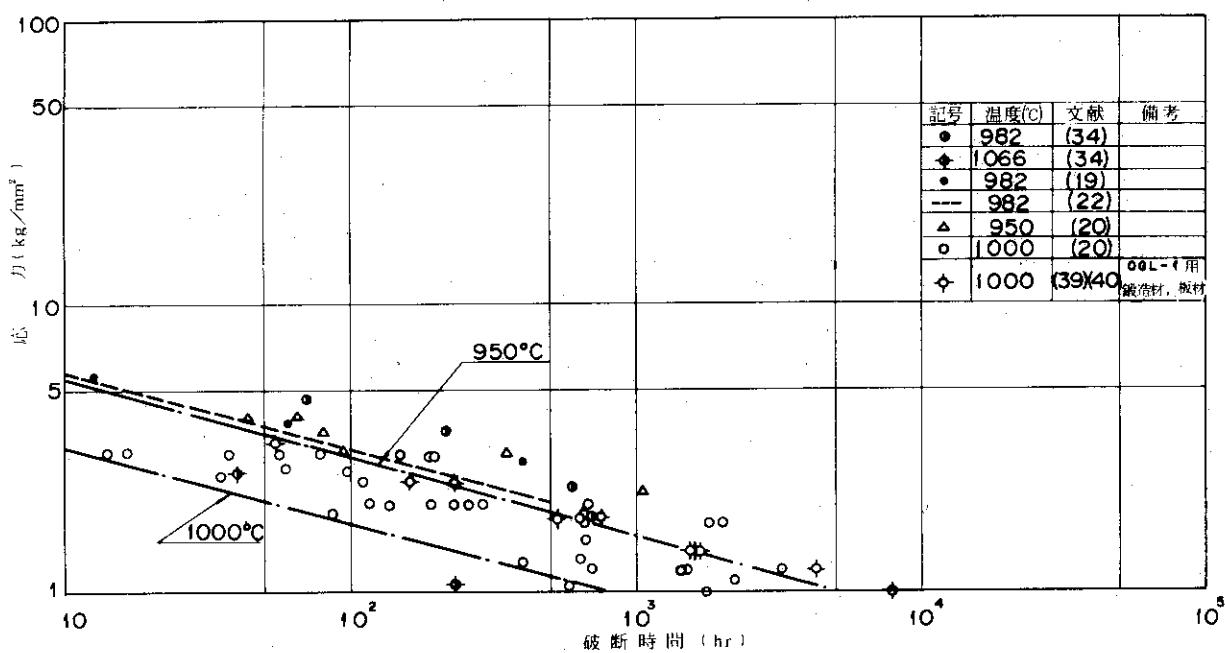


図 3 2 900~1,000°Cにおけるハステロイ-Xのクリープ破断強さ

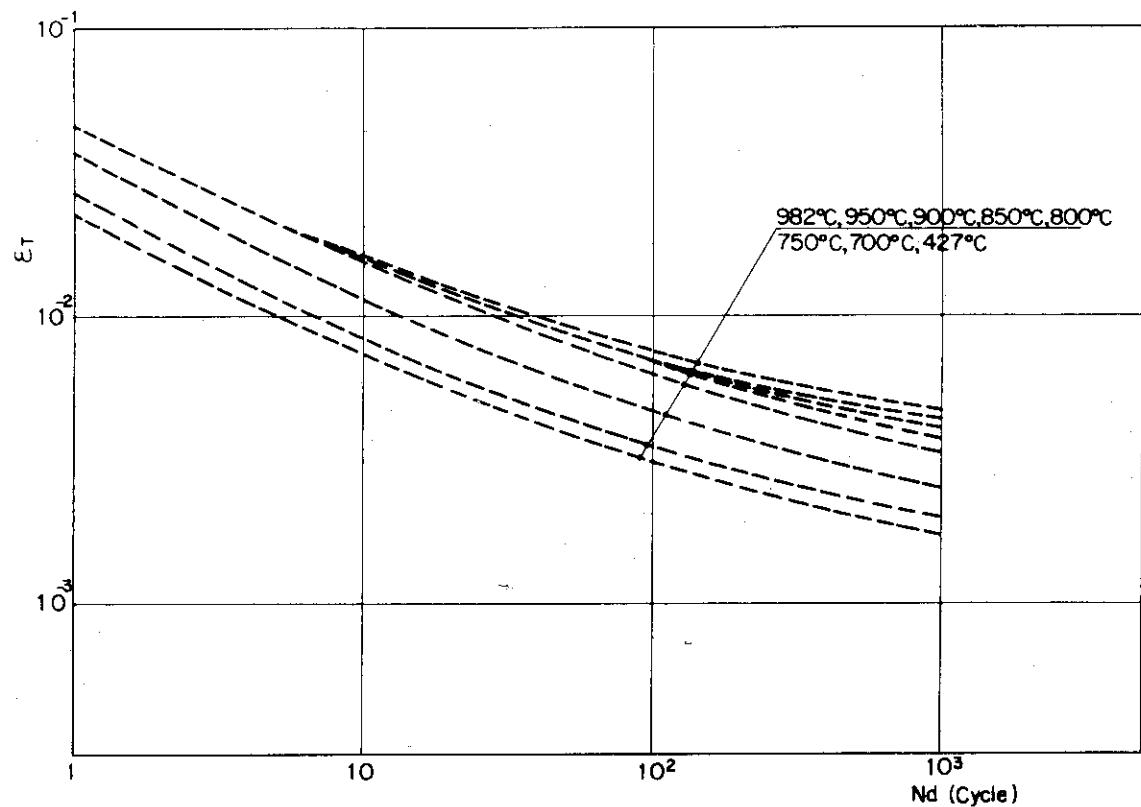


図 3.3 ハステロイ-X の設計疲労曲線

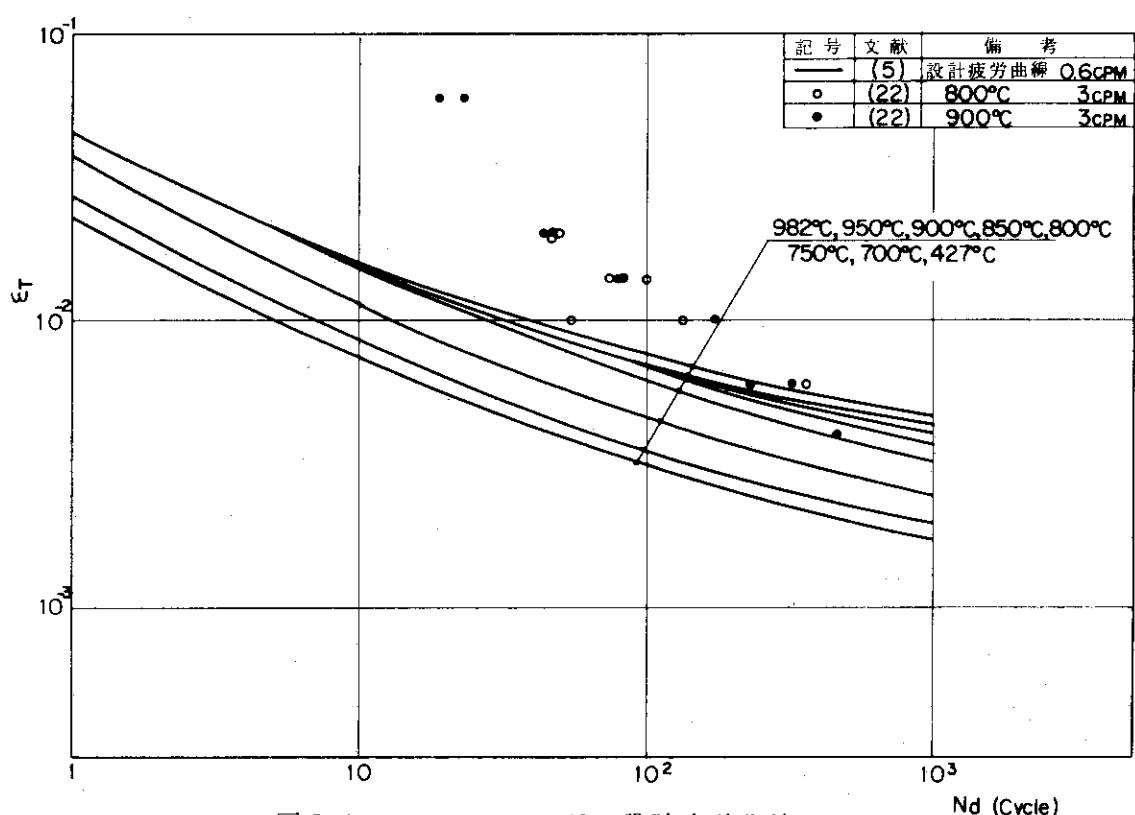


図 3.4 ハステロイ-X の設計疲労曲線

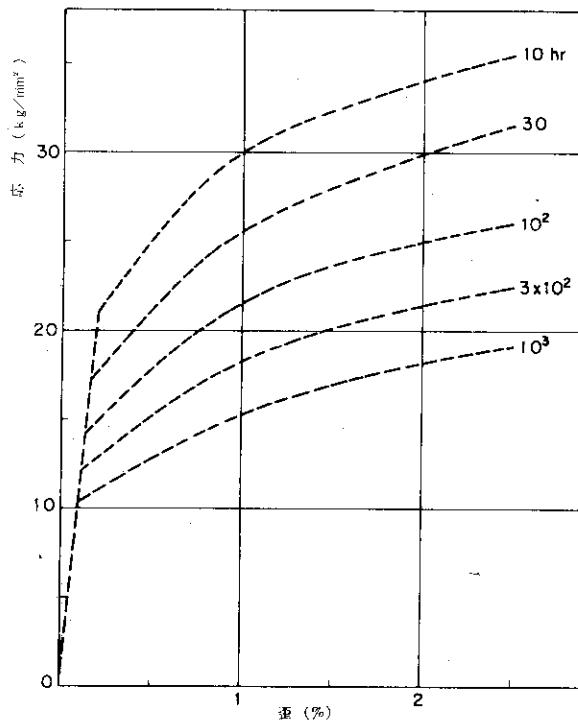


図35(a) ハステロイ-Xの等時応力歪曲線(650°C)

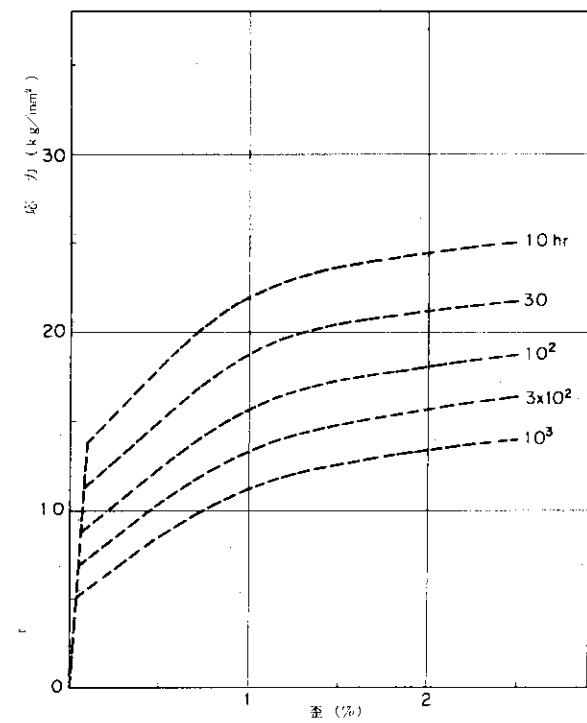


図35(b) ハステロイ-Xの等時応力歪曲線(700°C)

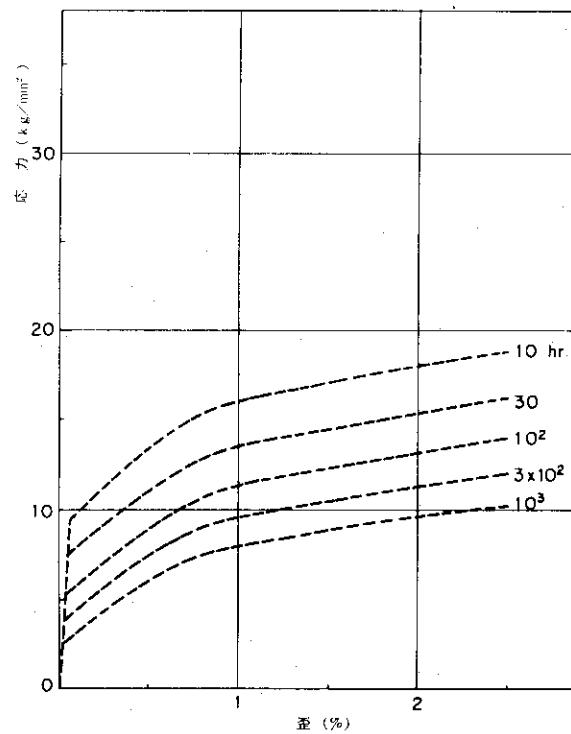


図35(c) ハステロイ-Xの等時応力歪曲線(750°C)

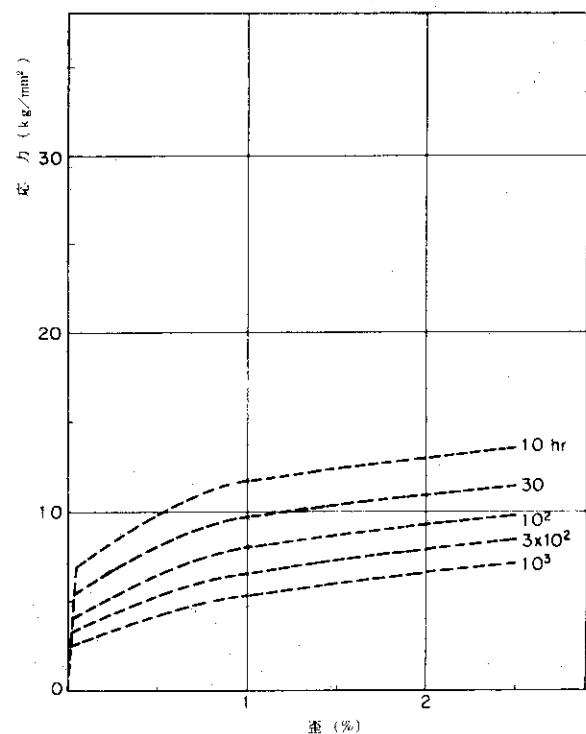


図35(d) ハステロイ-Xの等時応力歪曲線(800°C)

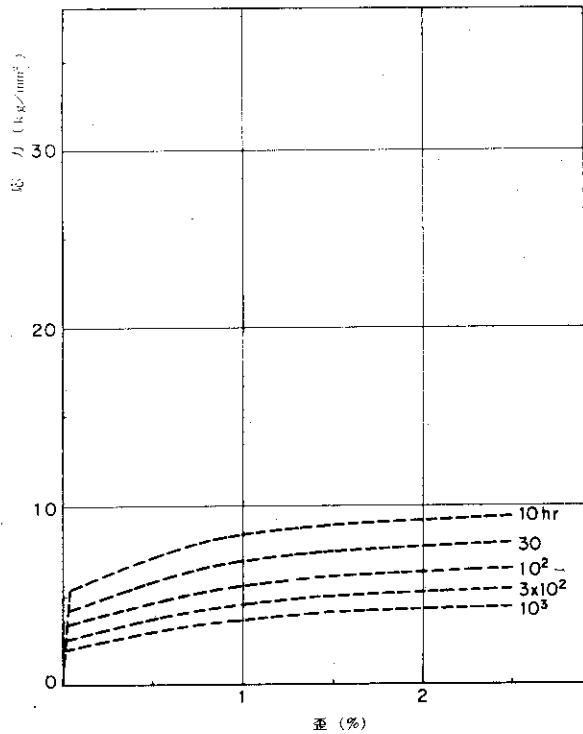


図35(e) ハステロイ-X の等時応力歪曲線 (850°C)

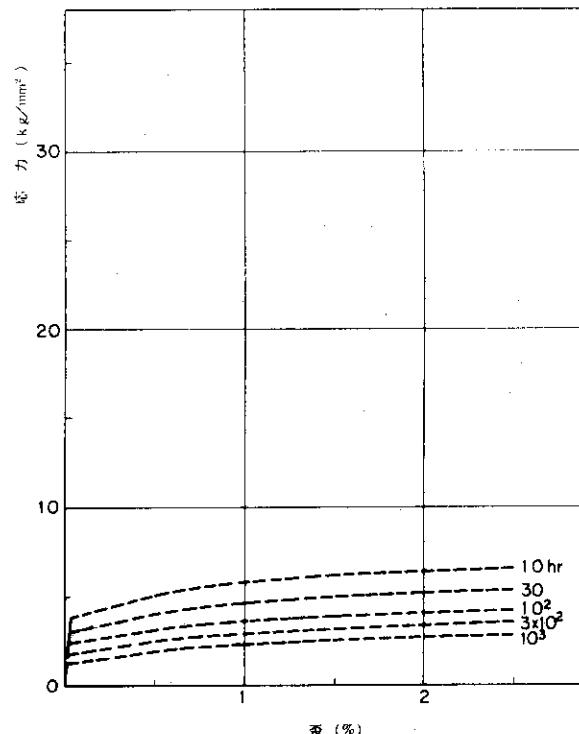


図35(f) ハステロイ-X の等時応力歪曲線 (900°C)

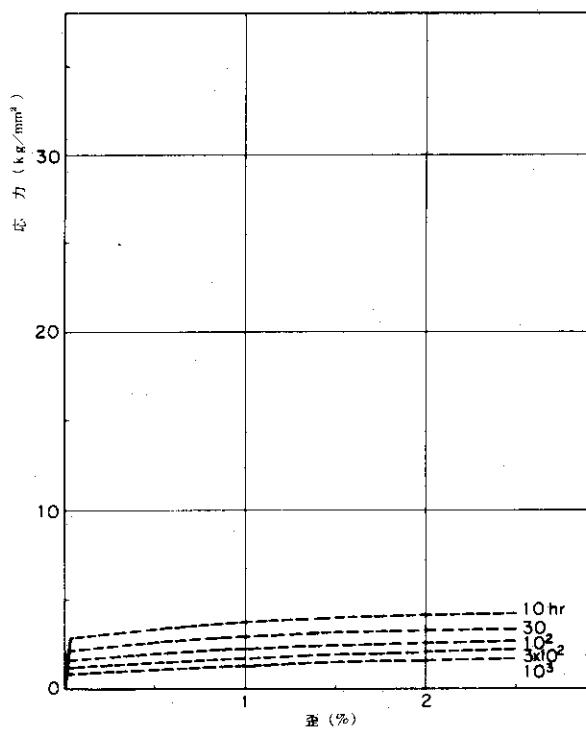


図35(g) ハステロイ-X の等時応力歪曲線 (950°C)

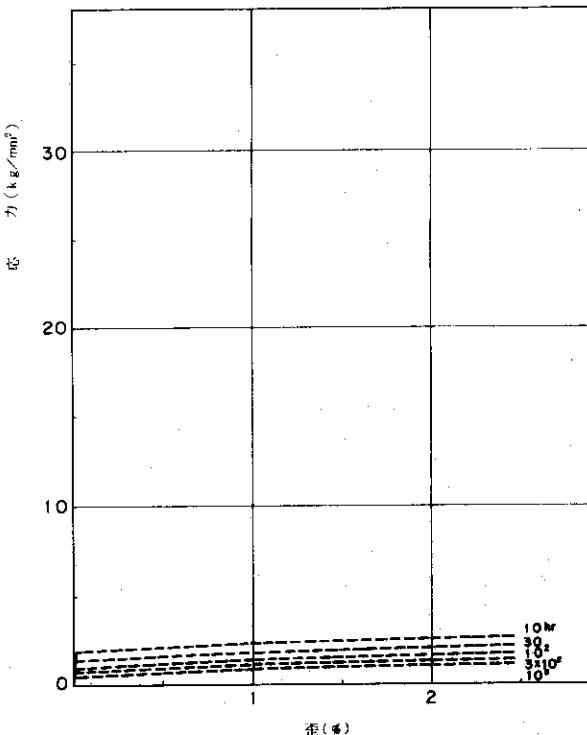


図35(h) ハステロイ-X の等時応力歪曲線 (1000°C)

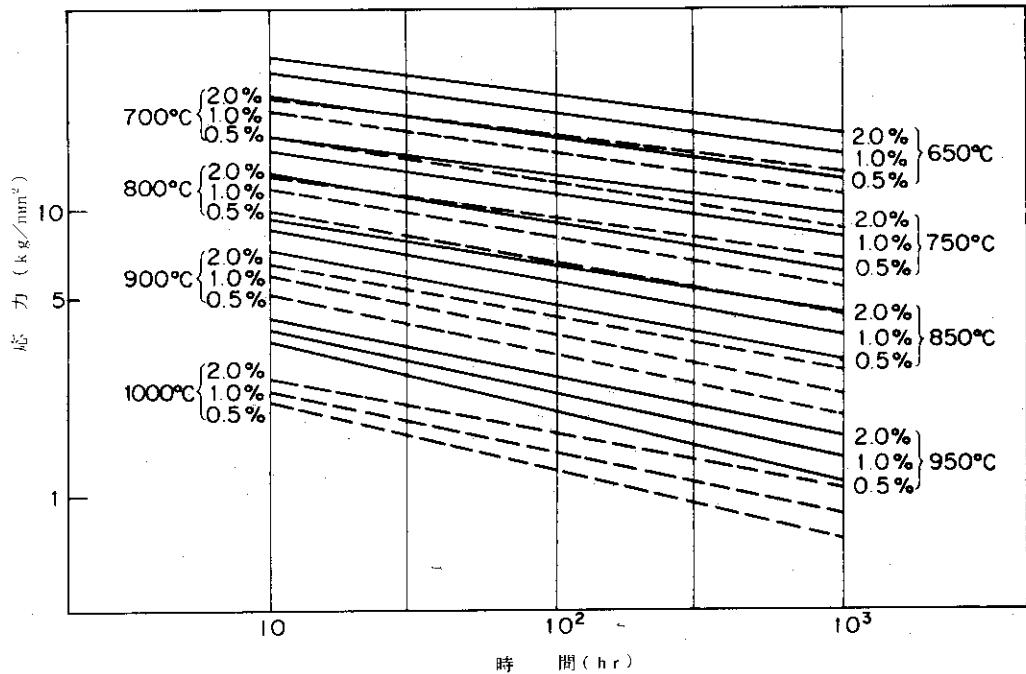


図 3.6 ハステロイ-X の設計曲線（文献(42)）

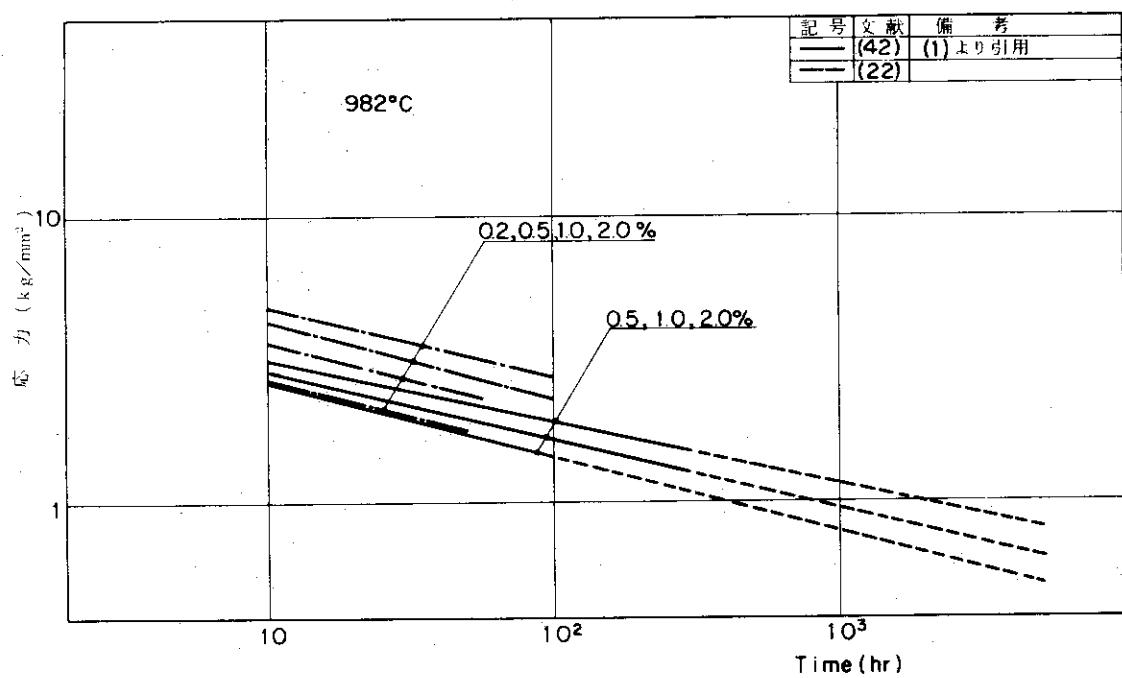


図 3.7 ハステロイ-X のクリープ設計曲線の比較

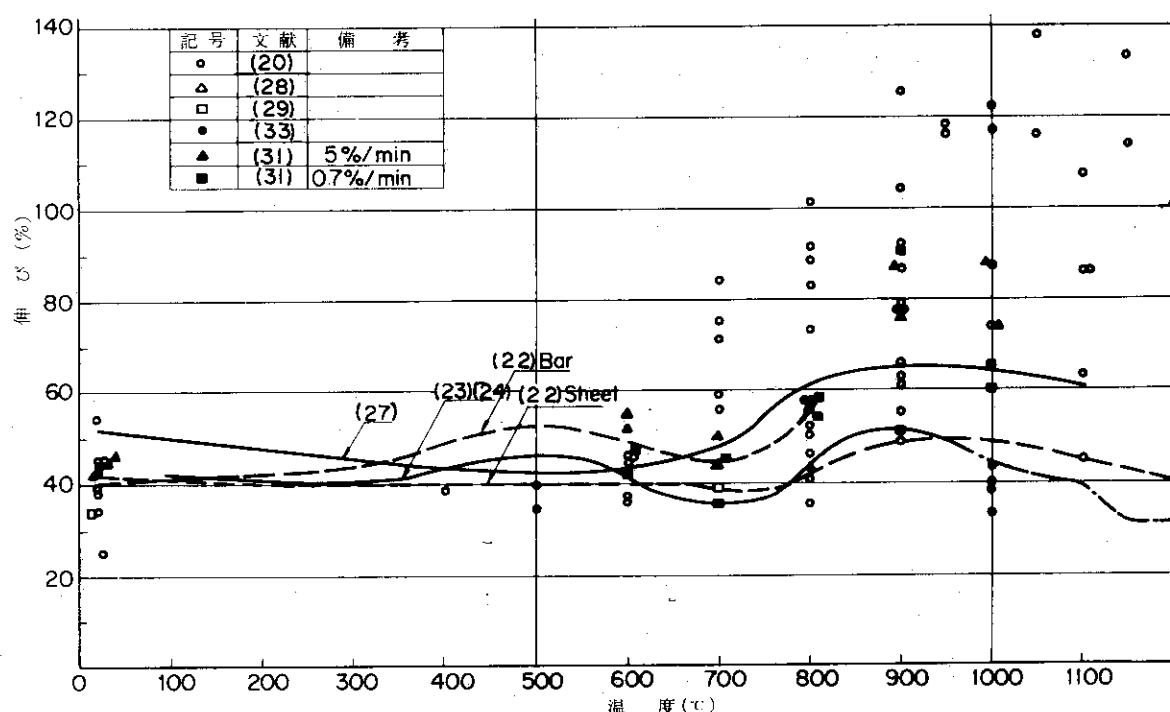


図 3-8 ハスティロイー X の引張試験における伸びと温度との関係

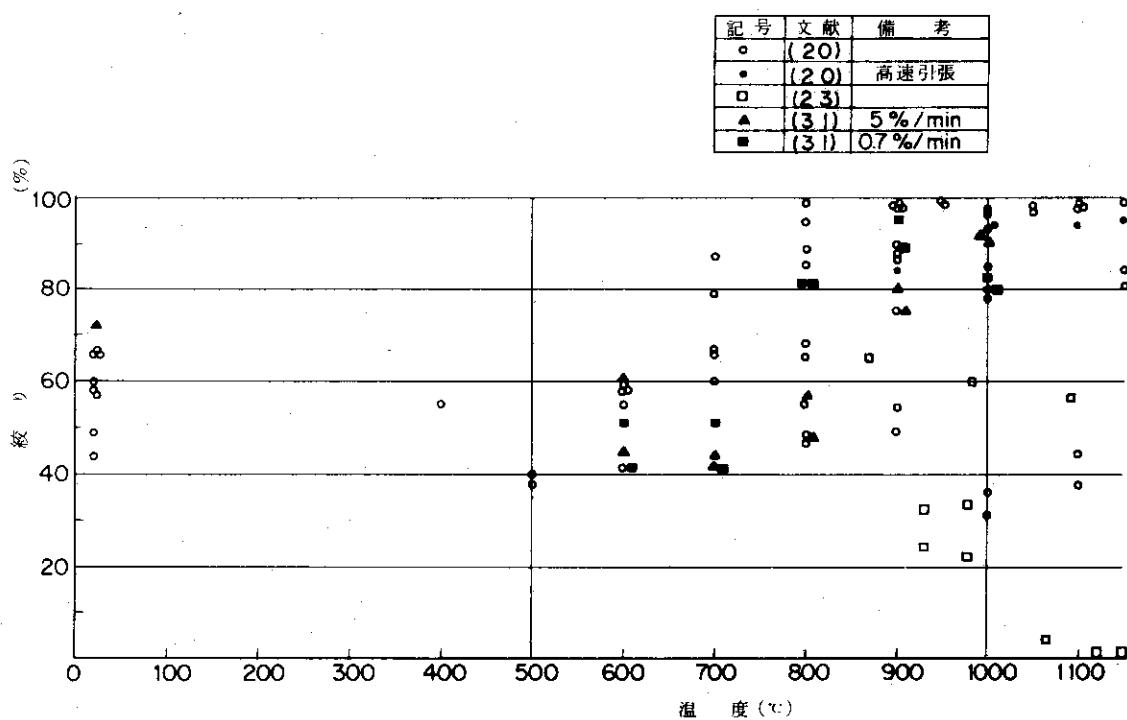


図 3-9 ハスティロイー X の引張試験における絞りと温度との関係

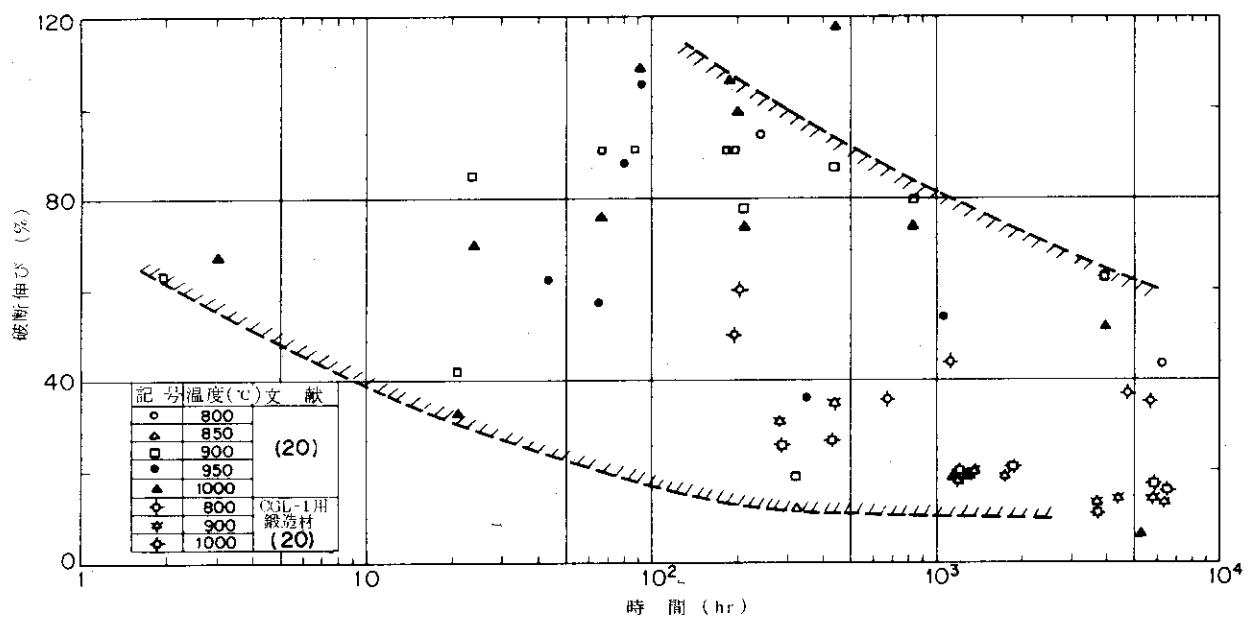


図 4 0 800~1000°CにおけるハスティロイーXのクリープ破断伸びとクリープ破断時間との関係

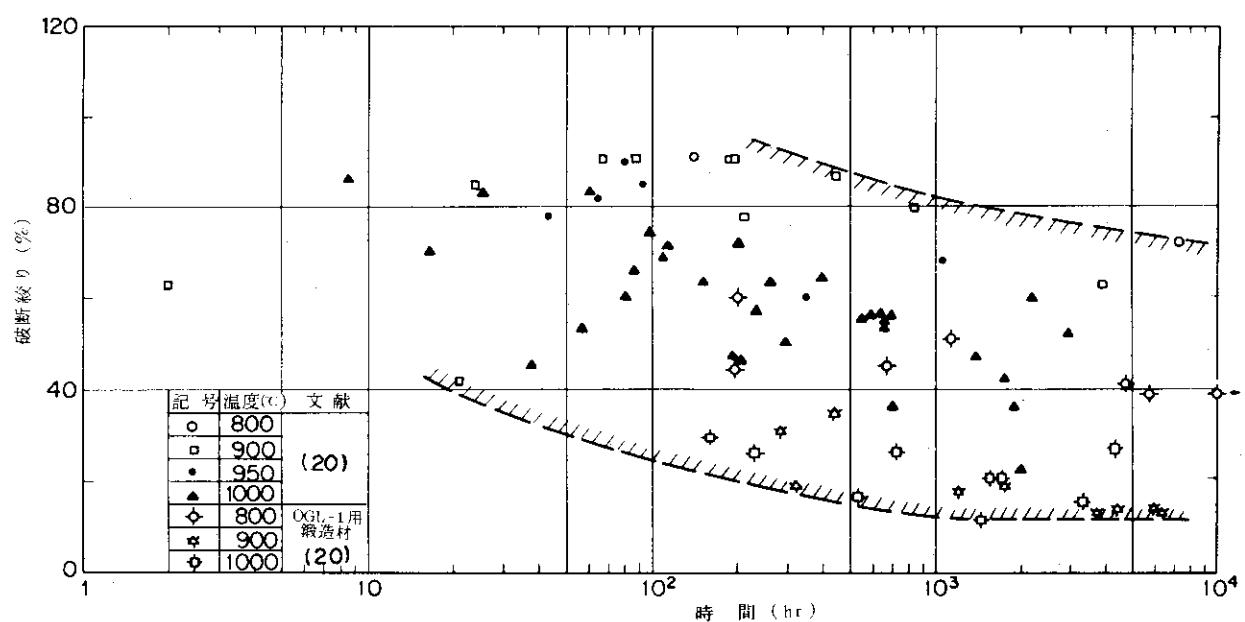


図 4 1 800~1000°CにおけるハスティロイーXのクリープ破断絞りとクリープ破断時間との関係