

JAERI-M

8709

ハステロイXのリラクセーション特性

1980年2月

鈴木一彦

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、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

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.

ハステロイ X のリラクセーション特性

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部

鈴木 一彦

(1980年1月26日受理)

非弾性応力解析コード TEPICCC-J を用いて、先に作成したハステロイ X のクリープ構成方程式からハステロイ X のリラクセーション線図(リラクセーション曲線やリラクセーション設計線図など)を作成した。これらのリラクセーションデータは、ORNL-5479 の試験データと良好に一致している。

また、実際の高温構造物におけるリラクセーション特性を把握するために、これらの構造物におけるリラクセーション挙動のうち三例について解析した。更に、これらのリラクセーション挙動をリラクセーション曲線から推測することを試みた。

Relaxation Characteristics of Hastelloy X

Kazuhiko SUZUKI

Division of Power Reactor Projects, JAERI

( Received January 26, 1980 )

Relaxation diagrams of Hastelloy X (relaxation curves, relaxation design diagrams, etc.) were generated from the creep constitutive equation of Hastelloy X, using inelastic stress analysis code TEPICC-J. These data are in good agreement with experimental relaxation data of ORNL-5479.

Three typical inelastic stress analyses were performed for various relaxation behaviors of the high-temperature structures. An attempt was also made to predict these relaxation behaviors by the relaxation curves.

Keywords: Relaxation Characteristics, Hastelloy X, Relaxation Curves, Relaxation Design Diagrams, Inelastic Stress Analysis, Creep Constitutive Equation, High-Temperature Structure, High-Temperature Gas-Cooled Reactor.

## 目 次

1. 序 .....	1
2. リラクセーションデータ .....	2
2.1 リラクセーション曲線の作成方法 .....	2
2.1.1 緒言 .....	2
2.1.2 解析コードTEPICC-J .....	2
2.1.3 ハステロイXの材料特性 .....	2
2.1.4 解析モデル .....	4
2.1.5 時間ステップ .....	5
2.1.6 初期応力が塑性域の場合の計算法 .....	5
2.2 リラクセーション曲線 .....	18
2.3 その他のリラクセーション線図 .....	65
2.3.1 リラクセーション設計線図 .....	65
2.3.2 $k\sigma_0$ - 時間線図 .....	65
2.3.3 残留応力-初期応力線図 .....	65
3. リラクセーション挙動の解析とクリープひずみの推定 .....	79
3.1 熱応力のリラクセーション .....	79
3.2 熱応力+機械荷重による応力のリラクセーション .....	89
3.3 まとめ .....	90
4. クリープ構成方程式とリラクセーション特性との関係 .....	96
5. あとがき .....	99
謝 辞 .....	99
文 献 .....	99

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Relaxation data .....	2
2.1 Method to generate relaxation curves .....	2
2.1.1 Introduction .....	2
2.1.2 Analysis code TEPICC-J .....	2
2.1.3 Material properties of Hastelloy X .....	2
2.1.4 Analysis model .....	4
2.1.5 Time step .....	5
2.1.6 Calculation method for the initial stresses in the plastic region .....	5
2.2 Relaxation curves .....	18
2.3 Other relaxation diagrams .....	65
2.3.1 Relaxation design diagrams .....	65
2.3.2 $k\sigma_0$ -Time diagrams .....	65
2.3.3 Residual stress-Initial stress diagrams .....	65
3. Analyses of relaxation behaviors and estimations of creep strains ..	79
3.1 Relaxation of thermal stress .....	79
3.2 Relaxation of thermal stress + mechanical stress .....	89
3.3 Conclusion .....	90
4. Relationship between creep constitutive equation and relaxation characteristics .....	96
5. Concluding remarks .....	99
Acknowledgement .....	99
References .....	99

## 1. 序

現在、設計ならびに研究開発が進められている多目的高温ガス実験炉の中間熱交換器の伝熱管や管板あるいは隔離弁の内部構造は1000℃近傍のヘリウム雰囲気にさらされている。このような高温においてはクリープ現象が著しく、従って、これらの機器はその設計温度がクリープ温度域にある構造物、即ち高温構造物として設計しなければならない。

このような高温構造物の設計に際しては、用いる構造材料のクリープデータはもちろんのこと、以下の理由からリラクセーションデータが必要かつ重要である。

- (i) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Case N-47 (旧Code Case 1592)においては熱応力ラッチェットやクリープラッチェットの防止等の目的でひずみ制限が課されているが、この制限を満たすか否かを弾性応力解析結果から評価する方法として Test No.1～Test No.4の4つの方法が同規格に認められている。この第4の方法、T-1325 Test No.4を利用するためには、リラクセーション強さ $S_{RH}$ ならびに $S_{RC}$ を定める必要があるが、そのためにはリラクセーション曲線を必要とする。
- (ii) 弾性応力解析により求められた初期応力分布はクリープ下においては時間の経過とともに変化する。この初期応力に熱応力などの変位制御型応力が含まれている場合には、これら変位制御型応力はクリープひずみが累積するに従い相応して減少してしまう、即ちリラクセーションしてしまうため、長時間経過後の応力分布は初期応力分布とは全く異なった応力分布（たとえば、荷重制御型応力のみ）になってしまう。この場合、各点の応力は最初は大きい時間の経過とともに小さくなっていく。それゆえ、弾性応力解析結果を用い、初期応力が減少しないものと仮定してクリープ疲労損傷評価に必要な累積クリープ損傷を求めると、実際よりも極めて過大な推定をすることになる。このような場合に、もし、リラクセーション曲線を用いて応力の時間推移が推定できるならば、より適切なクリープ損傷を推定でき、高温構造設計上極めて有用であると考えられる。

現在、多目的高温ガス実験炉の高温構造物はハステロイXをその構造材料として設計が進められており、従って、上記の理由からハステロイXのリラクセーション特性を明確にしておくことは重要である。しかしながら、現時点においてはハステロイXのリラクセーションデータは非常に少なく、それゆえ、ハステロイXのリラクセーション特性に関する情報はほとんど得られていない。ただ、ハステロイXのクリープデータに関してはある程度蓄積されているので、クリープとリラクセーションとは表裏一体であるという考えに立てば、これらのクリープデータからリラクセーション特性を推測することがある程度は可能である。そこで、筆者は、筆者らが先に作成したハステロイXのクリープ構成方程式<sup>(1)</sup>を基にして、非弾性応力解析コードTEPICC-Jを用いてハステロイXのリラクセーション特性を推定したので、ここに報告する。

更に、上記(ii)に関連して、円管などの実際の構造物におけるリラクセーション挙動を解析し、これらのリラクセーション挙動をリラクセーション曲線から推測することを試みた。

## 2. リラクゼーションデータ

本章では、リラクゼーション特性を記述する上で最も重要なデータであるリラクゼーション曲線（即ち、ある温度において、試験片に所定の変位  $\Delta u$  を与え、以後この変位に試験片を拘束しておく時、試験片の残留応力  $\sigma$  が時間の経過とともにどのように減少していくかを表わした曲線）をまず作成する。

ついで、得られたリラクゼーション曲線からリラクゼーション設計線図等を作成する。

### 2.1 リラクゼーション曲線の作成方法

#### 2.1.1 緒言

リラクゼーション曲線を実験から得る方法、即ちリラクゼーション試験方法は JIS Z 2276 などに細かく規定されている。参考のためにこの方法を簡単に述べると、まず、Fig. 2.1.1 に示すような試験片を無負荷状態で加熱装置を用いて所定の温度まで昇温する。そして、試験片が所定温度で熱平衡状態に達したら、設定全ひずみ値  $\epsilon_0$  に対応する初期応力  $\sigma_0$  を速やかに試験片に負荷する。以後、試験片温度を所定温度に保ち、また、試験片の全ひずみが  $\epsilon_0$  で一定に保持されるように負荷荷重を適宜調整しながら試験を続行する。そして、試験中に適宜、試験片残留応力を測定し、得られた測定データから、残留応力が時間とともにどのように減少していくかを描けば、それが、求めるリラクゼーション曲線である。

本報では、上記のようにして実験を行なってリラクゼーション曲線を求めるのではなく、実験に相当する解析モデルを設定し、非弾性応力解析コードを用いて数値解析によりリラクゼーション曲線を求める。

計算方法としては、筆者らが先に作成したハステロイ X のクリープ構成方程式<sup>(1)</sup> を有限要素法による熱弾塑性クリープ応力解析コード TEPICCC-J に組み込み、このコードを用いて、Fig. 2.1.2 に示す解析モデルを、引張りリラクゼーション試験に相当する支持条件、即ち一端を固定、他端を所定の正の強制変位に拘束するという条件の下で計算することとした。以下にその詳細を述べる。

#### 2.1.2 解析コード TEPICCC-J

本計算に用いた、有限要素法による熱弾塑性クリープ応力解析コード TEPICCC-J (Thermal Elastic Plastic Creep Stress Analysis Code - JAERI) の基本仕様を Table 2.1.1 に示す。

#### 2.1.3 ハステロイ X の材料特性

TEPICCC-J に組み込んだハステロイ X の弾性、塑性、クリープ特性を以下に示す。

##### 弾性定数

縦弾性係数  $E$  ならびにポアソン比  $\nu$  は、代表温度点においては Table 2.1.2 に示す値とする。ま



た、これらの弾性定数は等方とする。代表温度点以外の温度における弾性定数の値は、両隣の代表温度点における弾性定数値を直線内挿することによって求める。

塑性特性

塑性域の応力-ひずみ関係は、Fig 2.1.3に示すような multi-linear 硬化則によって表示する。そして、代表温度点においては Table 2.1.3ならびに Fig.2.1.4に示す応力-ひずみ関係にあるとする。

クリープ特性

クリープ特性は、筆者らが先に定めたクリープ構成方程式<sup>(1)</sup>によって表わされるものとする。この方程式の詳細は以下のとおり。

[ハステロイ X のクリープ構成方程式]

i) クリープひずみ-時間関係式

$$\epsilon_c = \epsilon_t (1 - e^{-rt}) + \dot{\epsilon}_{\min} t \quad \dots\dots\dots (2.1.1)$$

ここで、

$\epsilon_c$  = クリープひずみ [mm/mm]

$t$  = 時間 [hr]

$\epsilon_t$  = 最大一次クリープひずみ成分 [mm/mm]

$r$  = 一次クリープひずみ成分の時定数の逆数 [1/hr]

$\dot{\epsilon}_{\min}$  = 最小クリープひずみ速度 [mm/mm/hr]

ii)  $\dot{\epsilon}_{\min}$ ,  $\epsilon_t$ ,  $r$  の温度, 応力依存性

温度  $T$  の単位を  $^{\circ}\text{C}$ , 応力  $\sigma$  の単位を  $\text{kg/mm}^2$  とすると,  $\dot{\epsilon}_{\min}$ ,  $\epsilon_t$ ,  $r$  の温度依存性ならびに応力依存性は以下のように表わされる。

(a)  $\dot{\epsilon}_{\min}$  (Fig. 2.1.5 参照)

$\sigma \geq 0.015 \text{ kg/mm}^2$  では

$$(T + 273.15)(C - \log_{10} \dot{\epsilon}_{\min}) = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 ; x \equiv \log_{10} \sigma \quad \dots\dots\dots (2.1.2)$$

$$C = 16.0$$

$$b_0 = 2.57044 \times 10^4$$

$$b_1 = -4.08682 \times 10^3$$

$$b_2 = -1.12024 \times 10^3$$

$\sigma < 0.015 \text{ kg/mm}^2$  では

$$\dot{\epsilon}_{\min}(\sigma) = \dot{\epsilon}_{\min}(\sigma = 0.015 \text{ kg/mm}^2) \times \frac{\sigma}{0.015} \quad \dots\dots\dots (2.1.3)$$

$$\dot{\epsilon}_{\min}(\sigma = 0.015 \text{ kg/mm}^2) = 10^{f(\sigma = 0.015)}$$

$$f(\sigma = 0.015) \equiv 16.0 - \frac{2.94317 \times 10^4}{T + 273.15}$$

(b)  $\epsilon_t$  (Fig. 2.1.6, Fig. 2.1.7 参照)

$\epsilon_t$ の応力依存性  $\epsilon_t(\sigma)$ は下式で表わされる。

$$\epsilon_t(\sigma) = \begin{cases} \epsilon_t(T) = \text{応力に関して一定} ; \sigma \geq \sigma_0 & \dots\dots\dots (2.1.4) \\ \epsilon_t(T) \times \frac{\sigma}{\sigma_0} & ; \sigma < \sigma_0 \end{cases}$$

一方温度依存性  $\epsilon_t(T)$ は下式で表わされる。

$$\epsilon_t(T) = \begin{cases} \epsilon_{t,0} = \text{一定} & ; T \geq T_0 & \dots\dots\dots (2.1.5) \\ \epsilon_{t,0} + \alpha(T_0 - T) & ; T < T_0 \end{cases}$$

上式中の  $\sigma_0, T_0, \epsilon_{t,0}, \alpha$ の値はそれぞれ以下のとおり。

- $\sigma_0 = 5.0 \text{ [kg/mm}^2\text{]}$
- $T_0 = 750 \text{ [}^\circ\text{C]}$
- $\epsilon_{t,0} = 0.45 \times 10^{-2} \text{ [mm/mm]}$
- $\alpha = 1.108 \times 10^{-4} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$

(c)  $r$

$r$ は一次クリープ域終了時間 $t_1$ と下式の関係にある。

$$r \cdot t_1 = 4.60517 \dots\dots\dots (2.1.6)$$

$t_1$ の温度、応力依存性は次式で表わされる (Fig. 2.1.8参照)。

$$\log_{10} t_1 = \gamma + \alpha \sigma + \beta T \dots\dots\dots (2.1.7)$$

- $\gamma = 2.02833$
- $\alpha = -0.2362$
- $\beta = -0.02007$

ただし、 $t_1$ の単位はhr。

従って、 $r$ は次式で表わされる。

$$\log_{10} r = -19.6201 + 0.2362 \sigma + 0.02007 T \dots\dots\dots (2.1.8)$$

### 2.1.4 解析モデル

解析モデルは、Fig. 2.1.2に示すような、内径400mm、壁厚20mm、長さ100mmの円管とする。そしてこのモデルの下端の軸方向変位をゼロに拘束し、上端の軸方向変位を  $\Delta u$  に拘束する。

解析モデルの要素分割は、Fig. 2.1.9(b)に示す1要素分割とした。ただし、この分割方式にすると、全節点の軸方向変位がゼロか  $\Delta u$  に拘束されるため、軸方向自由度がゼロになってしまうので、軸方向自由度がゼロでない分割方式による計算も行ない、両方式の比較から、この方式の正当性を確認しておく必要がある。そこで、Fig. 2.1.9(a)に示す10要素分割モデルについてもリラクゼーション計算を行ない、両分割方式の計算結果が完全に一致することから、1要素分割方式による計算が正当であることを確認した。

## 2.1.5 時間ステップ

時間ステップ分割方法としていろいろな粗さの時間ステップ方式について比較した結果、各時間ステップにおいて、その時間ステップでの応力  $\sigma$  と次の時間ステップとの間で生ずる応力減少分  $\Delta\sigma$  との比  $\Delta\sigma/\sigma$  が 10% 以下であれば、残留応力の計算誤差は 1% 以下であることがわかった。そこで、 $\Delta\sigma/\sigma$  が概ね 2%、最大でも 10% に収まるように時間ステップを分割した。温度  $T = 850^\circ\text{C}$ 、初期応力  $\sigma_0 = 14.0 \text{ kg/mm}^2$  の場合の時間ステップを Table 2.1.4 に示す。

## 2.1.6 初期応力が塑性域の場合の計算法

TEPICC-J コードでは、生ずる応力が降伏応力を超えるような強制変位を解析モデルに与えると、強制変位に対応する応力を求めるための塑性繰返し計算が収束しないため途方もない応力値を出力する。従って、その初期応力が降伏応力を超えるリラクセーション曲線を求めようとする場合に、第 1 時間ステップ ( $t = 0.0$ ) において強制変位に対応する応力 (= 初期応力) を弾塑性応力解析によって求めることは不可能である。しかし、この問題は塑性計算を行なうがゆえに生ずるのであって、弾性計算を行なう限りにおいては支障ない。また、以下のように考えれば、初期応力が降伏応力を超える場合においても弾性クリープ応力解析によってリラクセーション曲線を求めることができる。そこで、本報では、その初期応力が降伏応力を超えるリラクセーション曲線はこの考え方に基いた弾性クリープ応力解析によって求めることにする。

[  $\sigma_0 \geq \sigma_y$  のリラクセーション曲線を弾性クリープ応力解析によって求める方法 ]

この方法が何故に可能かという、それは、初期応力が降伏応力を超える場合においてもそのリラクセーション過程においては塑性現象が全く生じないので、所定の強制変位に対応する初期応力を塑性計算以外の何らかの方法によって求めてしまえば、あるいは強制変位の代わりに最初から初期応力を入力してしまえば、以後の計算においては弾性計算で事足りるからである。即ち、リラクセーション開始時 ( $t = 0$ ) における全ひずみ  $\epsilon_0$ 、およびリラクセーション過程における任意の時間  $t$  での全ひずみ  $\epsilon_t$  はそれぞれ下式で表わされ、

$$\epsilon_0 = \sigma_0 / E + \epsilon_{p,0}$$

$$\sigma_0 / E = \text{初期応力 } \sigma_0 \text{ での弾性ひずみ}$$

$$\epsilon_{p,0} = \text{初期応力 } \sigma_0 \text{ での塑性ひずみ}$$

$$\epsilon_t = \sigma_t / E + \epsilon_{p,0} + \epsilon_{c,t}$$

$$\sigma_t = \text{時間 } t \text{ における残留応力}$$

$$\epsilon_{c,t} = \text{時間 } t \text{ におけるクリープひずみ}$$

$\epsilon_0 = \epsilon_t$  であることから、

$$\sigma_0 / E = \sigma_t / E + \epsilon_{c,t}$$

なる関係が成立するが、この関係式は初期応力  $\sigma_0$  が降伏応力未満の場合のリラクセーション関係式に他ならないからである。それゆえ、初期応力  $\sigma_0$  が降伏応力  $\sigma_y$  を超える場合でさえ、初期応力を  $\sigma_0$  とした弾性クリープ解析によりリラクセーション過程を描くことが可能である。

また、上記関係式に強制変位が無関係であること、ならびに、リラクセーション解析において必要な入力の本質的には初期応力であることから、実際の強制変位とは異なるけれども、強制変位  $\Delta u$  を  $\Delta u = \ell_0 \sigma_0 / E$  ( $\ell_0 =$  解析モデルの原長) として与え、弾性応力解析により初期応力  $\sigma_0$

を求め、以後のステップを弾性クリープ応力解析に接続しても実質的に問題はない。

以上のことから初期応力 $\sigma_0$ が降伏応力 $\sigma_y$ を超える場合においても、 $\sigma_0$ に対応する強制変位 $\Delta u$ を $\Delta u = \epsilon_0 \sigma_0 / E$ として与え、弾性クリープ応力解析によってリラクセーション曲線を求めることが可能である。

Table 2.1.1 TEPICCC-Jコードの仕様

解析機能	熱弾塑性クリープ応力解析	
解析対象	軸対称体, 平面 (平面応力, 平面ひずみ)	
要素形状	三角形, 四辺形	
最大要素数	1000 (変更可)	
最大節点数	1000 (変更可)	
最大材料数	6*	
荷重の種類	内・外圧, 節点荷重, 熱荷重	
変位境界条件	拘束, 強制変位, 一般化平面ひずみ条件, 斜角支持	
剛性行列方程式の解法	ガウス消去法	
異方性の取扱	弾性	可
	降伏応力	不可
	塑性	不可
	クリープ	不可
非定常温度下の解析	可	
応力-ひずみ線図の表示	直線硬化 (bilinear 硬化), multi-linear 硬化, n 乗硬化 ( $\sigma = \sigma_y + A \epsilon_p^n$ )	
降伏条件	Von Mises の条件	
加工硬化則	等方硬化	
クリープ曲線の入力形式	(i) 数式化してサブルーチンによる入力 (ii) 特定の温度において応力, 時間のべき乗形式としてインプットデータによる入力 (iii) 特定の温度, 応力において時間のべき乗形式としてインプットデータによる入力	
クリープ硬化則	ひずみ硬化	
時間ステップの自動分割	可	

\* 昭和54年12月現在, ハステロイXが3種類,  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼1種類, SUS304  
1種類が入っているため, 新たに追加可能な材料数は1つ。

Table 2.1.2 Elastic Constants of Hastelloy X

Temperature T °C	25	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Modulus of Elasticity E kg/mm <sup>2</sup>	2.07×10 <sup>4</sup>	2.01	1.93	1.85	1.77	1.69	1.61	1.53	1.46	1.38	1.30
Poisson's ratio ν	0.30										

Table 2.1.3 Multi-linear Type Stress-Strain Relationships of Hastelloy X

Temperature T °C	the First Step				the Second Step				the Third Step			
	1st break point		2nd break point		3rd break point		H <sub>2</sub>		H <sub>3</sub>		H <sub>3</sub> kg/mm <sup>2</sup>	
	$\sigma_1 = \sigma_y$ kg/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{p,1}$ %	$\epsilon_1$ %	H <sub>1</sub> kg/mm <sup>2</sup>	$\sigma_2$ kg/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{p,2}$ %	$\epsilon_2$ %	$\sigma_3$ kg/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{p,3}$ %	$\epsilon_3$ %		
25	24.0	0.0	0.1159	1.20×10 <sup>4</sup>	27.0	2.5×10 <sup>-2</sup>	0.1554	8.0×10 <sup>3</sup>	29.0	5.0×10 <sup>-2</sup>	0.1901	5.8×10 <sup>3</sup>
600	19.2	0.0	0.1193	1.28	22.4	2.5×10 <sup>-2</sup>	0.1641	8.4	24.5	5.0×10 <sup>-2</sup>	0.2022	5.0
650	18.6	0.0	0.1185	1.28	21.8	2.5×10 <sup>-2</sup>	0.1639	8.4	23.9	5.0×10 <sup>-2</sup>	0.2022	5.0
700	18.0	0.0	0.1176	1.28	21.2	2.5×10 <sup>-2</sup>	0.1636	8.4	23.3	5.0×10 <sup>-2</sup>	0.2023	5.0
750	17.4	0.0	0.1164	1.24	20.5	2.5×10 <sup>-2</sup>	0.1621	8.0	22.5	5.0×10 <sup>-2</sup>	0.2005	5.0
800	15.7	0.0	0.1075	1.12	18.50	2.5×10 <sup>-2</sup>	0.1517	6.8	20.2	5.0×10 <sup>-2</sup>	0.1884	4.0
850	13.2	0.0	0.0930	0.92	15.50	2.5×10 <sup>-2</sup>	0.1342	5.6	16.90	5.0×10 <sup>-2</sup>	0.1690	3.2
900	10.9	0.0	0.0790	0.80	12.90	2.5×10 <sup>-2</sup>	0.1185	4.4	14.00	5.0×10 <sup>-2</sup>	0.1514	2.6
950	8.5	0.0	0.0634	0.68	10.20	2.5×10 <sup>-2</sup>	0.1011	3.6	11.10	5.0×10 <sup>-2</sup>	0.1328	2.2
1000	6.4	0.0	0.0492	0.60	7.90	2.5×10 <sup>-2</sup>	0.0858	3.2	8.70	5.0×10 <sup>-2</sup>	0.1169	1.8

$\sigma_i$  = stress at the i-th break point

$\epsilon_{p,i}$  = plastic strain at the i-th break point

$\epsilon_i$  = total strain (= elastic strain + plastic strain) at the i-th break point

H<sub>i</sub> = hardening rate (=  $d\sigma/d\epsilon_p$ ) at the i-th step

Table 2.1.3 Multi-linear Type Stress-Strain Relationships of Hastelloy X (continued)

Temperature T °C	3rd Step		the Fourth Step		the Fifth Step	
	4th break point		H <sub>4</sub> kg/mm <sup>2</sup>	5th break point		H <sub>5</sub> kg/mm <sup>2</sup>
	σ <sub>4</sub> kg/mm <sup>2</sup>	ε <sub>p,4</sub> %		σ <sub>5</sub> kg/mm <sup>2</sup>	ε <sub>p,5</sub> %	
25	31.9	0.10	3.3×10 <sup>3</sup>	35.2	0.20	1.6×10 <sup>3</sup>
		0.2541			0.3700	
600	27.0	0.10	2.1	29.1	0.20	2.0×10 <sup>2</sup>
		0.2677			0.3807	
650	26.4	0.10	2.1	28.5	0.20	2.0
		0.2682			0.3815	
700	25.8	0.10	2.0	27.8	0.20	1.5
		0.2686			0.3817	
750	25.0	0.10	2.0	27.0	0.20	1.25
		0.2672			0.3806	
800	22.2	0.10	1.6	23.8	0.20	1.0×10 <sup>2</sup>
		0.2521			0.3630	
850	18.5	0.10	1.4	19.9	0.20	75.0
		0.2303			0.3401	
900	15.3	0.10	1.0	16.3	0.20	50.0
		0.2109			0.3181	
950	12.2	0.10	0.80	13.0	0.20	40.0
		0.1910			0.2970	
1000	9.6	0.10	0.60	10.2	0.20	30.0
		0.1738			0.2785	

Table 2.1.4 Time Step List for the Relaxation Curve at T=850°C,  
 $\sigma_0=14.0 \text{ kg/mm}^2$  (unit of time=hour)

0.0	0.014	0.40	3.4	9.6	55.0	970.0
0.00002	0.015	0.42	3.5	10.0	57.0	1000.0
0.00003	0.016	0.44	3.6	10.1	60.0	1050.0
0.00004	0.017	0.45	3.7	10.2	62.0	1100.0
0.00005	0.018	0.47	3.8	10.3	65.0	1150.0
0.00006	0.02	0.49	3.9	10.5	67.0	1200.0
0.00008	0.022	0.50	4.0	10.7	70.0	1300.0
0.0001	0.024	0.52	4.1	11.0	75.0	1400.0
0.00012	0.025	0.54	4.2	11.5	80.0	1500.0
0.00014	0.027	0.55	4.3	12.0	85.0	1600.0
0.00016	0.028	0.57	4.4	12.5	90.0	1700.0
0.00018	0.03	0.59	4.5	13.0	95.0	1800.0
0.0002	0.032	0.6	4.6	13.5	100.0	1900.0
0.00023	0.035	0.62	4.7	14.0	110.0	2000.0
0.00025	0.037	0.64	4.8	14.5	120.0	2100.0
0.00027	0.04	0.65	4.9	15.0	130.0	2200.0
0.0003	0.042	0.67	5.0	16.0	140.0	2300.0
0.00033	0.045	0.69	5.1	17.0	150.0	2400.0
0.00036	0.047	0.7	5.2	18.0	160.0	2500.0
0.0004	0.05	0.73	5.3	19.0	170.0	2600.0
0.00045	0.055	0.75	5.4	20.0	180.0	2700.0
0.0005	0.06	0.77	5.5	21.0	190.0	2800.0
0.00055	0.065	0.79	5.6	22.0	200.0	2900.0
0.0006	0.07	0.8	5.7	23.0	220.0	3000.0
0.00065	0.075	0.82	5.8	24.0	240.0	3100.0
0.0007	0.08	0.84	5.9	25.0	250.0	3200.0
0.0008	0.085	0.86	6.0	26.0	260.0	3300.0
0.0009	0.09	0.88	6.1	27.0	280.0	3400.0
0.001	0.095	0.9	6.2	28.0	300.0	3500.0
0.0011	0.1	0.93	6.3	29.0	330.0	3600.0
0.0012	0.11	0.96	6.4	30.0	360.0	3700.0
0.0013	0.12	0.98	6.5	31.0	400.0	3800.0
0.0015	0.13	1.0	6.6	32.0	420.0	3900.0
0.0016	0.14	1.06	6.7	33.0	440.0	4000.0
0.0018	0.15	1.1	6.8	34.0	460.0	4100.0
0.002	0.16	1.2	6.9	35.0	480.0	4200.0
0.0022	0.17	1.3	7.0	36.0	500.0	4300.0
0.0025	0.18	1.4	7.1	37.0	520.0	4400.0
0.0027	0.19	1.5	7.2	38.0	550.0	4500.0
0.003	0.2	1.6	7.3	39.0	570.0	4600.0
0.0032	0.21	1.7	7.4	40.0	600.0	4700.0
0.0035	0.22	1.8	7.5	41.0	620.0	4800.0
0.004	0.23	1.9	7.6	42.0	650.0	4900.0
0.0045	0.24	2.0	7.7	43.0	670.0	5000.0
0.005	0.25	2.1	7.8	44.0	700.0	5100.0
0.0055	0.26	2.2	8.0	45.0	720.0	5200.0
0.006	0.28	2.3	8.2	46.0	750.0	5400.0
0.0065	0.3	2.4	8.4	47.0	770.0	5600.0
0.007	0.31	2.5	8.5	48.0	800.0	5800.0
0.008	0.32	2.6	8.6	49.0	820.0	6000.0
0.009	0.34	2.8	8.8	50.0	850.0	6200.0
0.01	0.35	3.0	9.0	51.0	870.0	6400.0
0.011	0.37	3.1	9.2	52.0	900.0	6600.0
0.012	0.38	3.2	9.4	53.0	920.0	6800.0
0.013	0.39	3.3	9.5	54.0	950.0	7000.0



7200.0	45000.0	100000.0
7400.0	46000.0	
7600.0	47000.0	
7800.0	48000.0	
8000.0	49000.0	
8200.0	50000.0	
8400.0	51000.0	
8600.0	52000.0	
8800.0	53000.0	
9000.0	54000.0	
9200.0	55000.0	
9400.0	56000.0	
9600.0	57000.0	
9800.0	58000.0	
10000.0	59000.0	
10300.0	60000.0	
10500.0	61000.0	
10700.0	62000.0	
11000.0	63000.0	
11500.0	64000.0	
12000.0	65000.0	
12500.0	66000.0	
13000.0	67000.0	
13500.0	68000.0	
14000.0	69000.0	
15000.0	70000.0	
16000.0	71000.0	
17000.0	72000.0	
18000.0	73000.0	
19000.0	74000.0	
20000.0	75000.0	
21000.0	76000.0	
22000.0	77000.0	
23000.0	78000.0	
24000.0	79000.0	
25000.0	80000.0	
26000.0	81000.0	
27000.0	82000.0	
28000.0	83000.0	
29000.0	84000.0	
30000.0	85000.0	
31000.0	86000.0	
32000.0	87000.0	
33000.0	88000.0	
34000.0	89000.0	
35000.0	90000.0	
36000.0	91000.0	
37000.0	92000.0	
38000.0	93000.0	
39000.0	94000.0	
40000.0	95000.0	
41000.0	96000.0	
42000.0	97000.0	
43000.0	98000.0	
44000.0	99000.0	

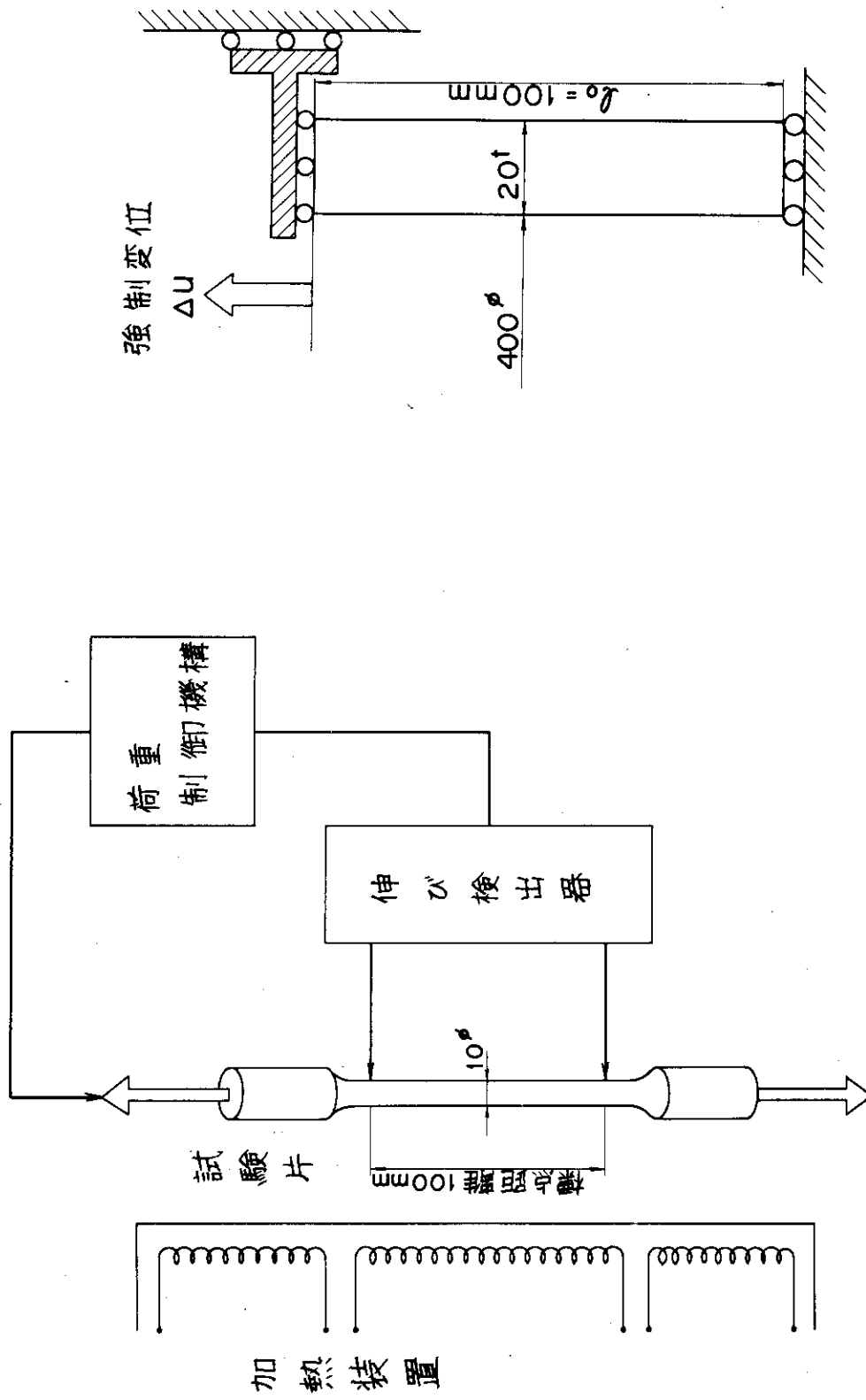


Fig.2.1.2 解析モデル

Fig.2.1.1 リラクゼーション試験方法

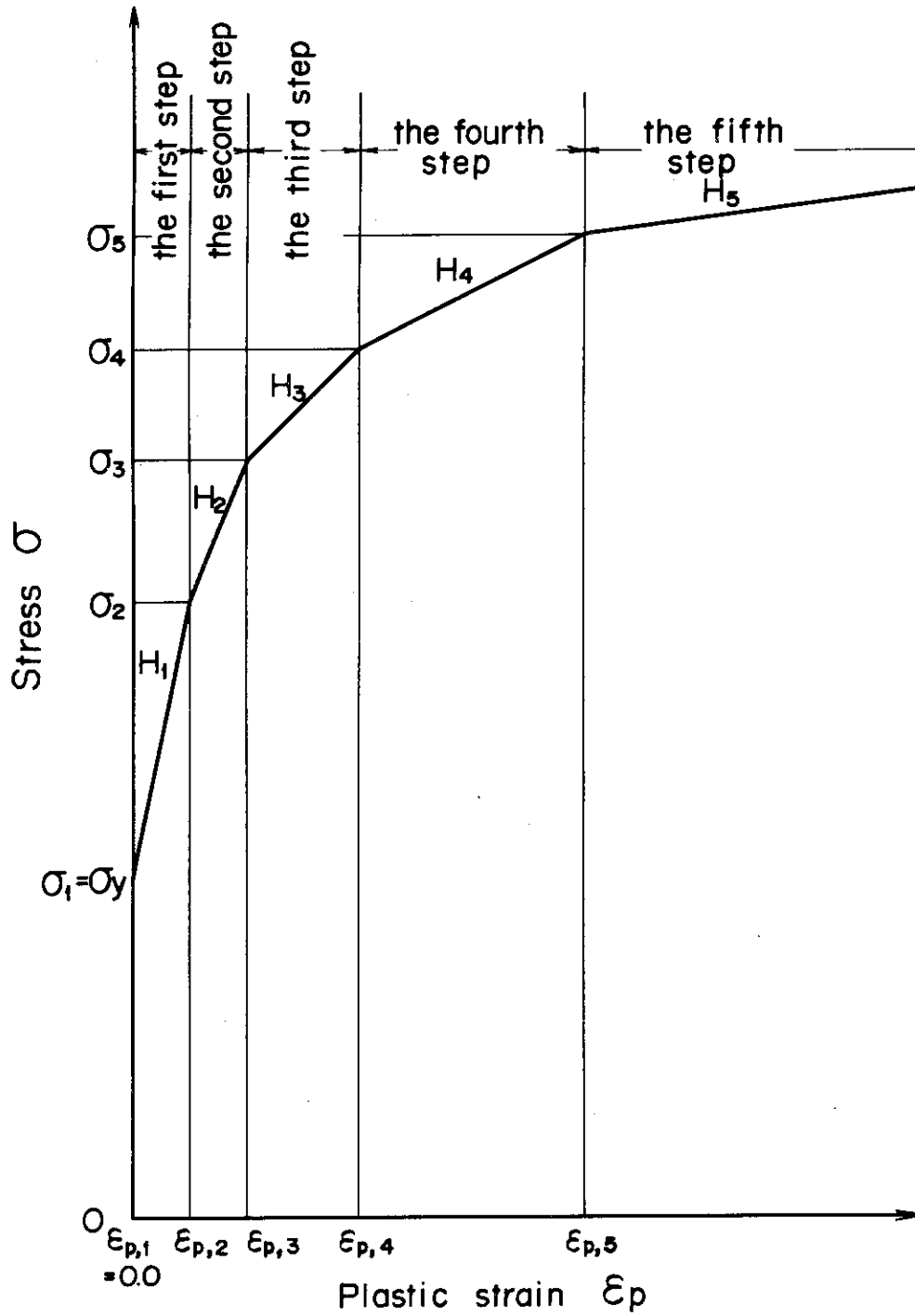


Fig.2.1.3 Multi-linear type Stress - Strain Diagram.

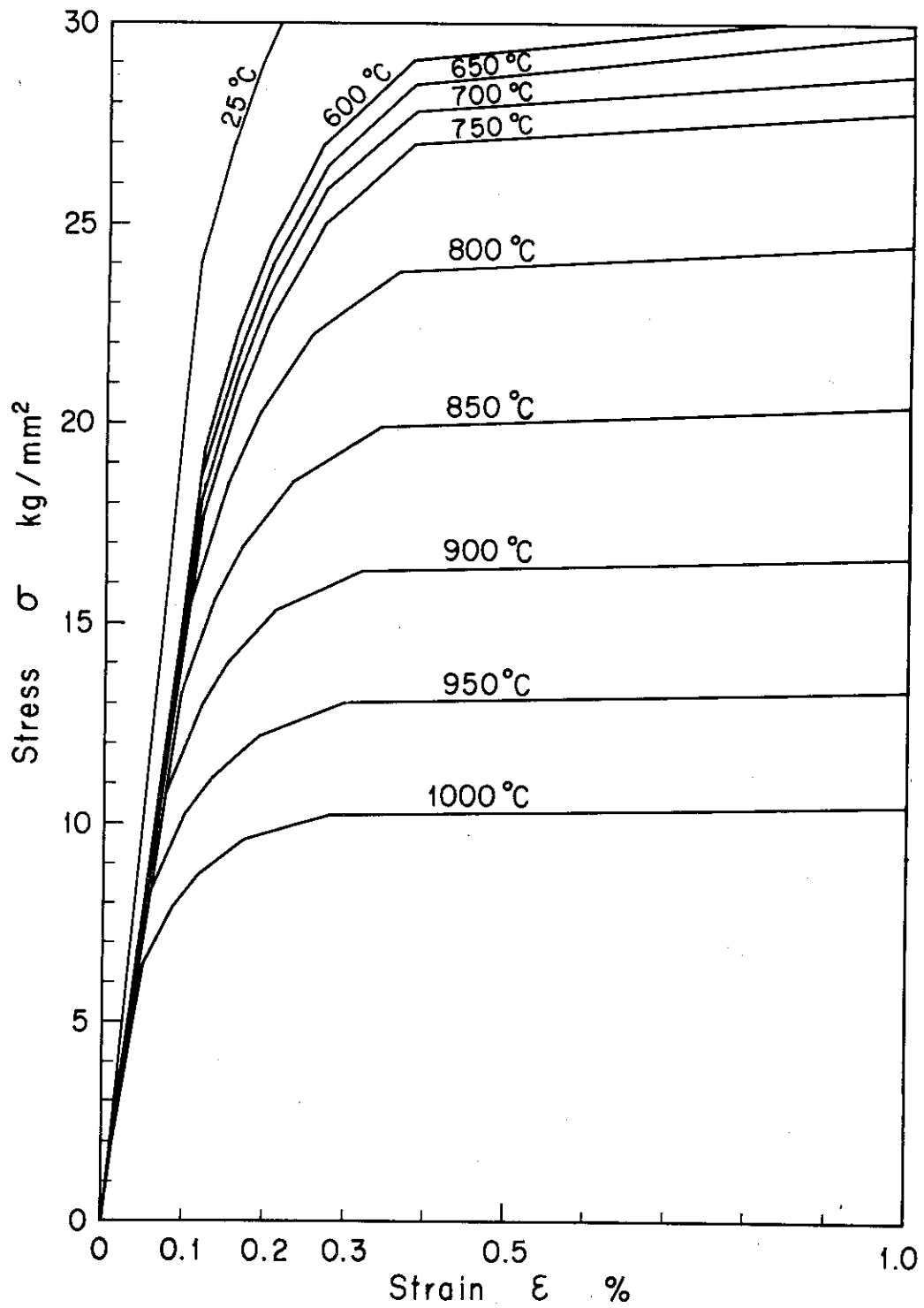


Fig. 2.1.4 Stress-Strain Diagram of Hastelloy X for TEPICC-J Code

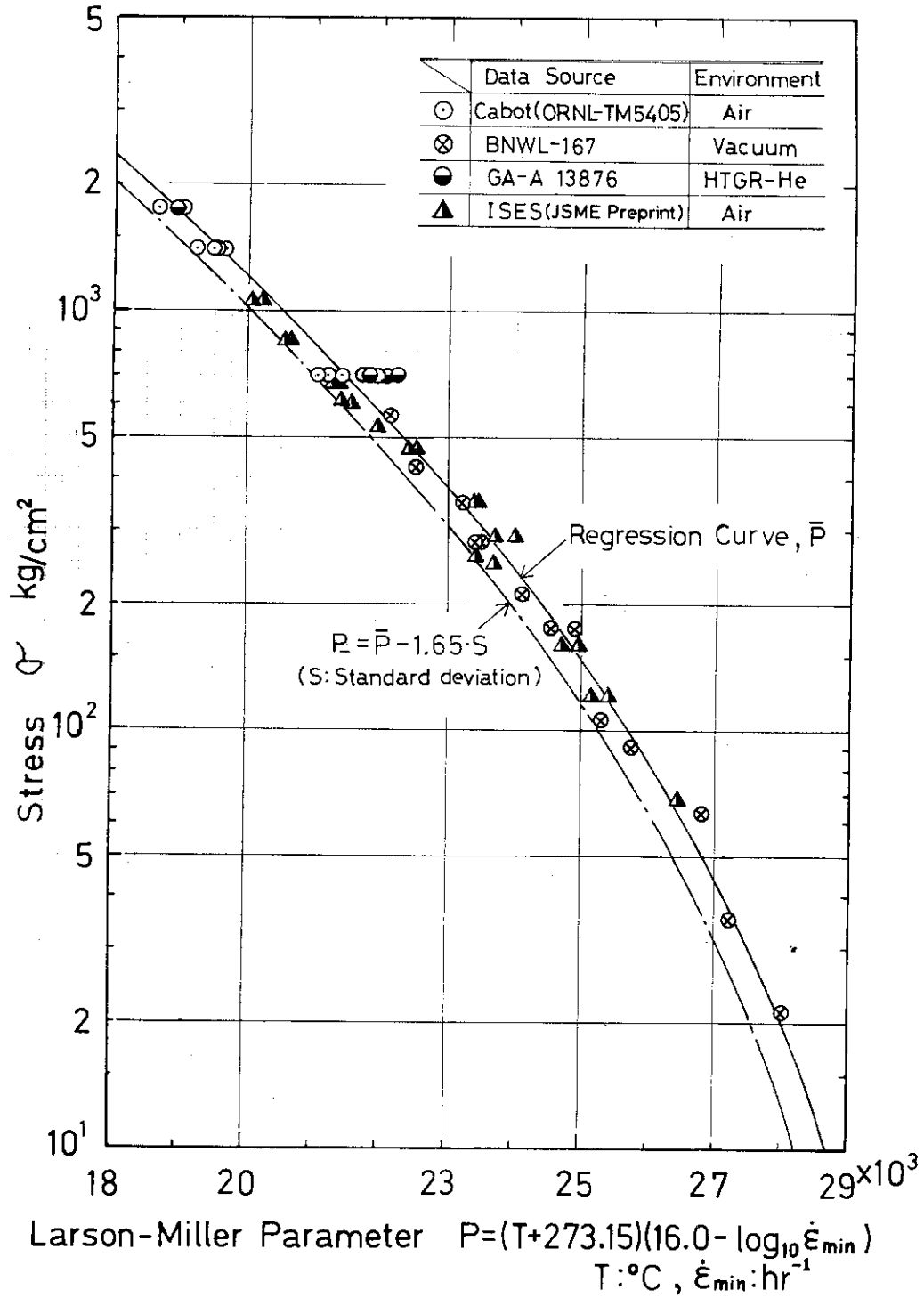


Fig. 2.1.5 Relation of Minimum Creep Rate  $\dot{\epsilon}_{min}$  and Temperature T, Stress  $\sigma$ .

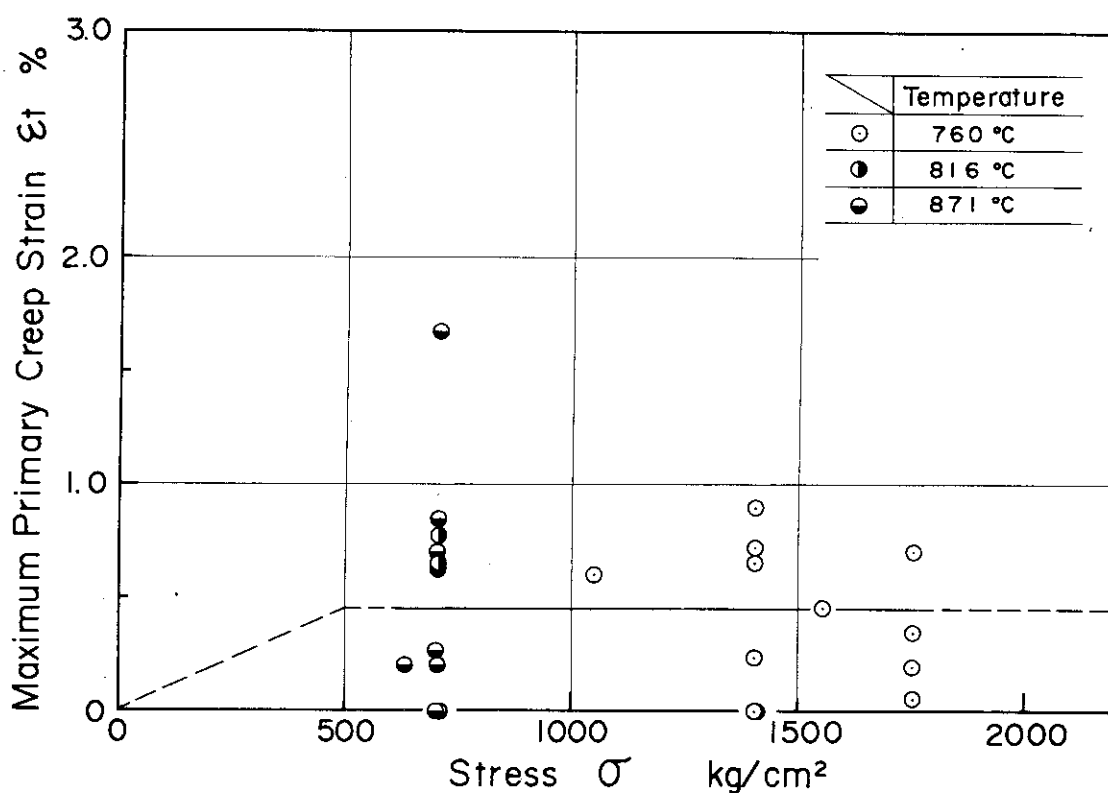


Fig. 2.1.6 Relation between  $\epsilon_t$  and  $\sigma$

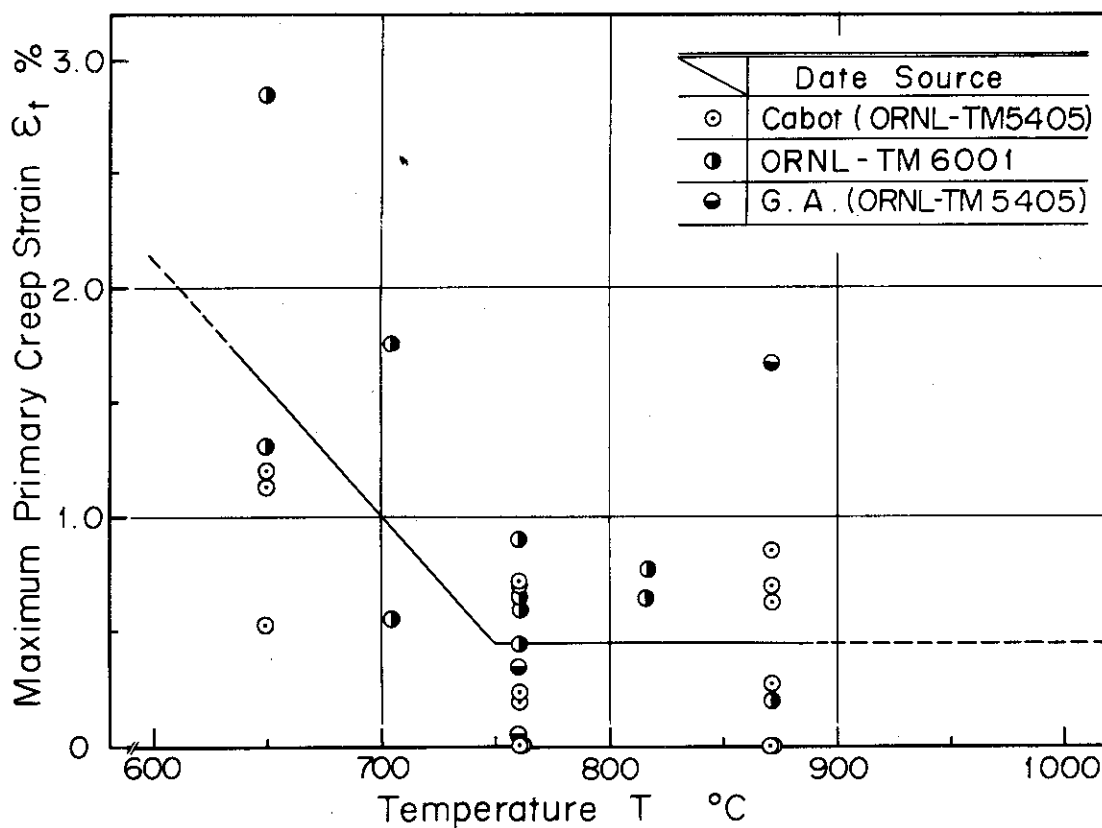


Fig. 2.1.7 Relation between  $\epsilon_t$  and T

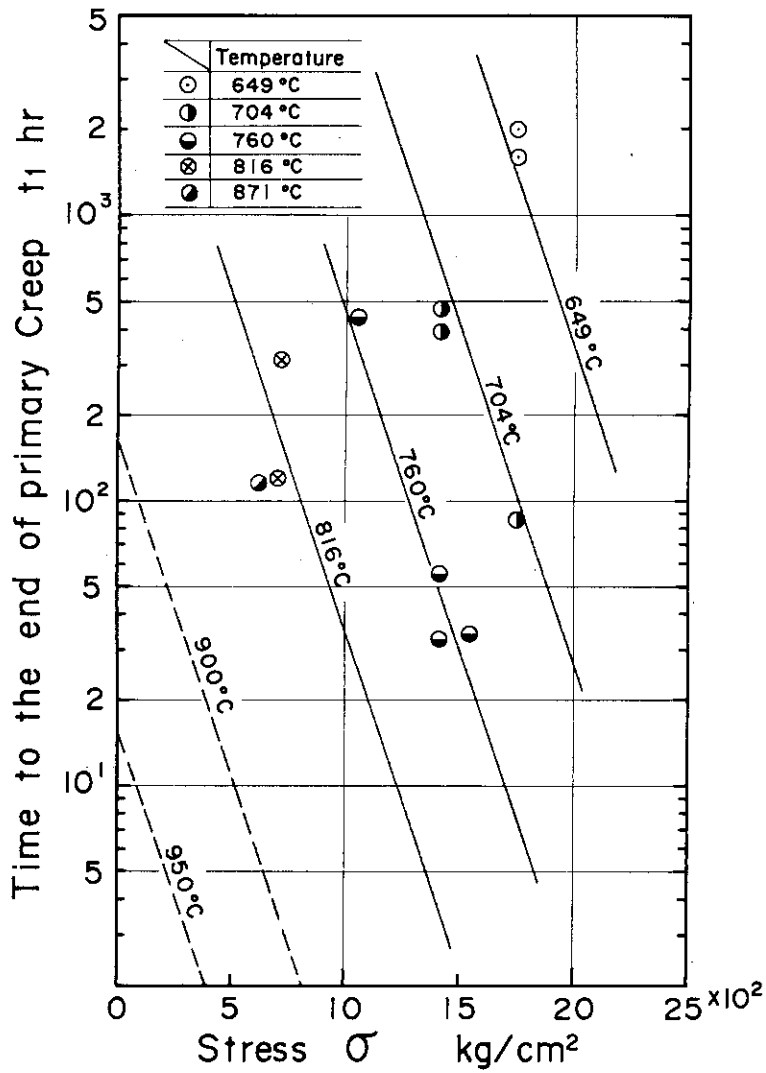


Fig. 2.1.8 Relation between  $t_1$  and stress

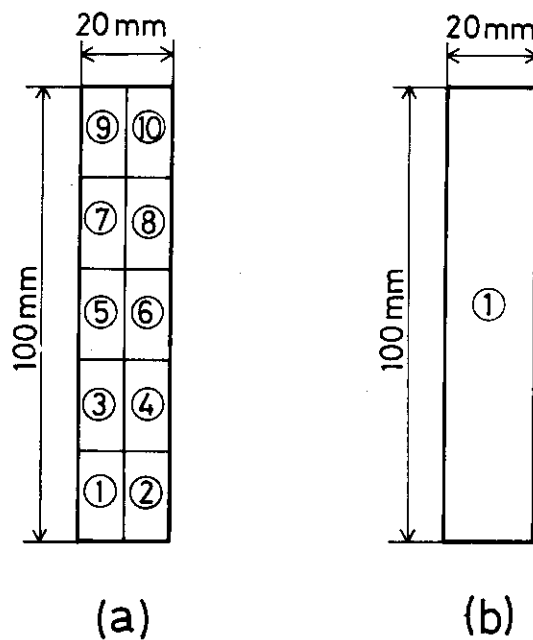


Fig. 2.1.9 解析モデルの要素分割

## 2.2 リラクゼーション曲線

得られた残留応力-時間データを初期応力をパラメータにして両対数グラフ上に描くと Fig 2.2.1 ~ Fig 2.2.7 のようになる。これらの図中、曲線上の箱マーク“□”は、この時間区間内においてクリープひずみ速度の成分構成が1次クリープひずみ速度成分 ( $= \dot{\epsilon}_t r e^{-rt}$ ) + 2次クリープひずみ速度成分 ( $= \dot{\epsilon}_{\min}$ ) から、2次クリープひずみ速度成分のみへと変わることを示している。また、時間軸のみを対数で目盛った片対数グラフ上に描くと Fig. 2.2.8 ~ Fig. 2.2.14 のようになる。なお、Table 2.2.1 ~ Table 2.2.7 に、得られたリラクゼーションデータのうちのいくつかを示す。

これらのリラクゼーション曲線を相互比較すると以下のようなことがわかる。

- i. 各リラクゼーション曲線の残留応力減少傾向は単純ではなく、たとえば両対数グラフ上に描くと、最初は上に凸の曲線であるが、次第に勾配がほぼゼロになってしまう。しかし、更に時間が増すと再び勾配が急になって上に凸の曲線を描く。このように、リラクゼーション途中において高原状態領域がみられる。なお、この高原状態領域は、クリープひずみ速度が2次クリープひずみ速度成分（即ち、最小クリープひずみ速度）のみから成る領域の開始点（両対数グラフ上で、“□”印の時間区間内）から始まっている。
- ii. iで述べた傾向は初期応力の高低によって異なり、低初期応力（概ね  $\sigma_0 \leq 2 \text{ kg/mm}^2$ ）においてはその減少傾向は類似しているが、初期応力が高くなるにつれて低時間側ならびに高原状態領域以後での減少が加速され、逐には高原状態領域もほとんど消滅して比較的単純な減少曲線（たとえば、 $T = 850^\circ\text{C}$ における  $\sigma_0 = 2.0 \text{ kg/mm}^2$  でのリラクゼーション曲線）になる。
- iii. 高初期応力のリラクゼーション曲線群（たとえば、 $T = 900^\circ\text{C}$ においては、両対数グラフ上の  $\sigma_0 = 5.0, 10.0, 15.0 \text{ kg/mm}^2$  などの曲線、片対数グラフ上では  $\sigma_0 = 6.0, 8.0, 12.0, 16.0 \text{ kg/mm}^2$  などの曲線）には、低時間側においていったん互いに接近し、その後再び離れ、高原状態領域を通過後再び接近するという傾向がみられる。

このiiiの傾向は、本解析がクリープ則にひずみ硬化則を用いていることによる。即ち、クリープ則にひずみ硬化則を用いると、ある時間ステップにおけるクリープひずみ速度  $\dot{\epsilon}_c$  はその時間における応力  $\sigma$ 、温度  $T$ 、ならびにそれまでに累積したクリープひずみ量  $\epsilon_c$  によって表わされるため、

$$\dot{\epsilon}_c = f(\sigma, T, \epsilon_c)$$

たとえば、初期応力が  $\sigma_{0,1}$  のリラクゼーション曲線と  $\sigma_{0,2}$  のリラクゼーション曲線 ( $\sigma_{0,1} < \sigma_{0,2}$  とする) が時間  $t^*$  で一致しても（そのときの残留応力を  $\sigma^*$  とする）、それまでに累積したクリープひずみ量  $\epsilon_{c,1}$ 、 $\epsilon_{c,2}$  が異なるため（下式）、

$$\epsilon_{c,1} = \frac{\sigma_{0,1}}{E} - \frac{\sigma^*}{E}$$

$$\epsilon_{c,2} = \frac{\sigma_{0,2}}{E} - \frac{\sigma^*}{E}$$



$$\therefore \dot{\epsilon}_{C,1} < \dot{\epsilon}_{C,2}$$

相応してクリープひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{C,1}$ ,  $\dot{\epsilon}_{C,2}$  も異なる ( $\partial \dot{\epsilon}_C / \partial \epsilon_C < 0$  であれば  $\dot{\epsilon}_{C,1} > \dot{\epsilon}_{C,2}$ ) からである。なお、クリープ則に時間硬化則〔注1〕を用いれば、二つのリラクセーション曲線がいったん一致してしまうと以降において両曲線が離れることはない。このように、クリープ則にいずれの硬化則を用いて計算するかによりリラクセーション曲線が大きく異なるので注意する必要がある。

一方、初期応力  $\sigma_0$  が  $10.0 \text{ kg/mm}^2$  の場合と  $20.0 \text{ kg/mm}^2$  の場合について、いろいろな温度でのリラクセーション曲線を比較すると Fig. 2. 2. 15, Fig. 2. 2. 16 のようになる。この両図から以下のことがわかる。

- i. 温度  $T$  が  $750^\circ\text{C}$  以上では、高原状領域が生ずる残留応力の値はほぼ同一であり、また、所定の残留応力まで減少する時間に着目すると、本図のように等温度間隔のリラクセーション曲線群の場合には、リラクセーション曲線は対数時間でほぼ等間隔に並んでいる（即ち、ある温度から  $\Delta T$ ,  $2 \Delta T$ ,  $3 \Delta T$  と低くなるに従って、減少する時間は  $k$  倍、約  $2k$  倍、約  $3k$  倍に増加する）。
- ii. しかし、温度が  $750^\circ\text{C}$  以下ではこれらの傾向は崩れ、更に、低残留応力域において、リラクセーション曲線がより低い温度でのリラクセーション曲線と交差し、その結果、高温側の方が残留応力が高くなる時間領域が存在する。

このように、 $750^\circ\text{C}$  を境にしてリラクセーション傾向が異なるのは、クリープ構成方程式の最大一次クリープひずみ成分  $\epsilon_t$  の温度依存性が  $750^\circ\text{C}$  を境にして異なっているからである。そして、 $750^\circ\text{C}$  以下において、同一初期応力においてさえ、温度の低い方が残留応力が低い時間領域が存在するのは、 $\epsilon_t$  が  $750^\circ\text{C}$  以下では温度に関して減少関数になっているからである。即ち、 $T_1 < T_2 < 750^\circ\text{C}$  において以下の関係があるからである。

$$\epsilon_t(\sigma, T_1) > \epsilon_t(\sigma, T_2)$$

というのは、クリープひずみ速度  $\dot{\epsilon}_C$  は仮想時間〔注2〕 $\tau$  に関して

$$\dot{\epsilon}_C = \epsilon_t r e^{-r\tau} + \dot{\epsilon}_{\min}$$

と表わされるため、 $\dot{\epsilon}_{\min}$  が必ず

$$\dot{\epsilon}_{\min}(\sigma, T_1) < \dot{\epsilon}_{\min}(\sigma, T_2)$$

という関係にあっても、上記のように  $\epsilon_t$  の大小関係が  $\dot{\epsilon}_{\min}$  とは逆になっていることにより  $\dot{\epsilon}_C$  の大小関係が以下のようになりうるからである。

$$\dot{\epsilon}_C(\sigma, T_1) > \dot{\epsilon}_C(\sigma, T_2)$$

このように、リラクセーション特性はクリープ構成方程式に非常に敏感である（これに関する検討は第4章参照）。

〔注1〕時間硬化則の場合には、クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ はその時間における応力 $\sigma$ 、温度 $T$ 、ならびにその時間 $t$ によって定まる。即ち、

$$\dot{\epsilon}_c = f(\sigma, T, t)$$

〔注2〕クリープ則にひずみ硬化則を用いているので実時間 $t$ は意味がない。実時間 $t$ での応力が $\sigma'$ 、温度が $T'$ 、クリープひずみが $\epsilon'_c$ のとき、応力 $\sigma'$ 、温度 $T'$ でのクリープひずみ曲線で $\epsilon'_c$ に対応する時間 $\tau$ のことを本報では仮想時間と称する。

Table 2.2.1 Relaxation data at temperature T = 1000.0°C

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr							
	t=1×10 <sup>-5</sup> hr	5×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	2×10 <sup>-4</sup>	5×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	2×10 <sup>-3</sup>	5×10 <sup>-3</sup>
0.05	0.04998	0.04992	0.04983	0.04966	0.0492	0.0483	0.0467	0.0423
0.1	0.09997	0.09983	0.09965	0.09930	0.0983	0.0966	0.0933	0.0842
0.2	0.19993	0.19963	0.19927	0.19853	0.1964	0.1928	0.1859	0.1669
0.4	0.39984	0.39918	0.3984	0.3967	0.392	0.384	0.369	0.328
0.5	0.49978	0.4989	0.4978	0.4957	0.489	0.479	0.459	0.405
0.6	0.59973	0.5986	0.5973	0.5945	0.586	0.573	0.548	0.482
0.8	0.79959	0.7979	0.7959	0.7918	0.780	0.760	0.724	0.628
1.0	0.99942	0.9971	0.9943	0.989	0.972	0.945	0.895	0.767
1.5	1.4989	1.4943	1.4886	1.477	1.445	1.393	1.299	1.077
2.0	1.9980	1.9898	1.9797	1.960	1.903	1.816	1.664	1.333
3.0	2.9945	2.973	2.946	2.90	2.76	2.56	2.25	1.693
4.0	3.987	3.936	3.88	3.76	3.48	3.13	2.65	1.901
5.0	4.971	4.86	4.74	4.52	4.04	3.51	2.89	2.02
6.0	5.949	5.76	5.55	5.19	4.46	3.77	3.04	2.10
6.4(= $\sigma_y$ )	6.336	6.10	5.85	5.43	4.60	3.85	3.08	2.12
7.0	6.910	6.59	6.26	5.75	4.78	3.95	3.14	2.15
8.0	7.844	7.33	6.85	6.17	5.00	4.07	3.21	2.197
9.0	8.738	7.96	7.31	6.47	5.16	4.15	3.256	2.234
10.0	9.572	8.46	7.65	6.68	5.26	4.21	3.294	2.267
11.0	10.32	8.84	7.89	6.82	5.33	4.25	3.325	2.298

Table 2.2.1 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr							
	$t=1 \times 10^{-2}$ hr	$2 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-2}$	$7 \times 10^{-2}$	0.1	0.2	0.5
0.05	0.0359	0.0261	0.01936	0.01142	0.0076	0.0052	0.0039	0.0038
0.1	0.0712	0.0516	0.0382	0.0225	0.01495	0.01025	0.0079	0.0077
0.2	0.1402	0.1006	0.0741	0.0436	0.0291	0.0202	0.01574	0.01532
0.4	0.271	0.1913	0.1395	0.0820	0.0555	0.0394	0.0315	0.0310
0.5	0.333	0.233	0.1692	0.0995	0.0678	0.0487	0.0394	0.0388
0.6	0.393	0.272	0.1971	0.1160	0.0795	0.0578	0.0473	0.0465
0.8	0.505	0.345	0.248	0.1464	0.1017	0.0754	0.0630	0.0620
1.0	0.608	0.409	0.293	0.1738	0.1224	0.0926	0.0787	0.0775
1.5	0.826	0.539	0.384	0.232	0.1692	0.1337	0.1177	0.1159
2.0	0.993	0.635	0.452	0.280	0.211	0.1733	0.1565	0.1538
3.0	1.210	0.763	0.551	0.361	0.288	0.250	0.234	0.228
4.0	1.334	0.845	0.623	0.432	0.361	0.325	0.309	0.300
5.0	1.411	0.908	0.686	0.499	0.433	0.400	0.384	0.368
6.0	1.468	0.962	0.744	0.565	0.503	0.473	0.456	0.432
6.4(= $\sigma_y$ )	1.488	0.983	0.767	0.591	0.531	0.502	0.484	0.457
7.0	1.515	1.014	0.801	0.631	0.573	0.546	0.526	0.492
8.0	1.558	1.063	0.857	0.696	0.642	0.617	0.594	0.547
9.0	1.598	1.112	0.913	0.760	0.711	0.687	0.658	0.597
10.0	1.636	1.160	0.969	0.824	0.779	0.755	0.719	0.642
11.0	1.673	1.208	1.024	0.888	0.845	0.820	0.777	0.683

Table 2.2.1 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr							
	t=1.0hr	2.0	5.0	10.0	20.0	30.0	50.0	$1 \times 10^2$
0.05	0.0037	0.0035	0.0028	0.0020	0.0011	0.0005	0.0001	$<1 \times 10^{-5}$
0.1	0.0074	0.0069	0.0057	0.0041	0.0021	0.0011	0.0003	$<1 \times 10^{-4}$
0.2	0.01482	0.01387	0.01137	0.0082	0.0042	0.0022	0.0006	$<1 \times 10^{-4}$
0.4	0.0304	0.0292	0.0257	0.0204	0.01104	0.0057	0.0015	$<1 \times 10^{-4}$
0.5	0.0381	0.0367	0.0328	0.0268	0.01635	0.0085	0.0023	$<1 \times 10^{-4}$
0.6	0.0457	0.0442	0.0397	0.0330	0.0216	0.01191	0.0032	0.0001
0.8	0.0610	0.0589	0.0531	0.0447	0.0309	0.01986	0.0055	0.0002
1.0	0.0761	0.0735	0.0661	0.0556	0.0392	0.0266	0.0084	0.0003
1.5	0.1135	0.1089	0.0966	0.0801	0.0564	0.0398	0.01659	0.0006
2.0	0.1500	0.1427	0.1243	0.1009	0.0698	0.0494	0.0229	0.0009
3.0	0.220	0.205	0.1712	0.1330	0.0883	0.0618	0.0302	0.0014
4.0	0.285	0.260	0.208	0.1552	0.0996	0.0690	0.0341	0.0017
5.0	0.345	0.308	0.236	0.1705	0.1069	0.0734	0.0364	0.0019
6.0	0.399	0.347	0.256	0.1812	0.1116	0.0762	0.0379	0.0021
6.4(= $\sigma_y$ )	0.418	0.361	0.263	0.1845	0.1131	0.0771	0.0383	0.0021
7.0	0.446	0.380	0.272	0.1887	0.1149	0.0781	0.0388	0.0022
8.0	0.487	0.407	0.284	0.1941	0.1171	0.0794	0.0395	0.0023
9.0	0.523	0.429	0.293	0.1981	0.1187	0.0803	0.0399	0.0023
10.0	0.554	0.446	0.300	0.2010	0.1199	0.0810	0.0402	0.0023
11.0	0.580	0.461	0.305	0.2033	0.1208	0.0815	0.0405	0.0024

Table 2.2.2 Relaxation data at temperature T = 950.0°C

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr						
	$t=2\times 10^{-5}$ hr	$1\times 10^{-4}$	$2\times 10^{-4}$	$5\times 10^{-4}$	$1\times 10^{-3}$	$2\times 10^{-3}$	$5\times 10^{-3}$
0.1		0.09996	0.09993	0.09982	0.09964	0.09929	0.0982
0.2		0.19993	0.19985	0.19962	0.19925	0.1985	0.1963
0.4		0.39983	0.39966	0.39916	0.3983	0.3966	0.392
0.5		0.49978	0.49955	0.4989	0.4978	0.4956	0.489
0.6		0.59972	0.59943	0.5986	0.5972	0.5944	0.586
0.8		0.79958	0.79916	0.7979	0.7958	0.792	0.779
1.0	0.99988	0.99941	0.9988	0.9970	0.994	0.988	0.971
1.5	1.4998	1.4988	1.4976	1.4940	1.488	1.476	1.442
2.0	1.9996	1.9979	1.9957	1.9893	1.979	1.958	1.898
3.0	2.9988	2.9940	2.988	2.970	2.942	2.89	2.74
4.0	3.9971	3.985	3.971	3.929	3.86	3.74	3.43
5.0	4.9933	4.967	4.935	4.84	4.70	4.47	3.95
6.0	5.988	5.939	5.88	5.71	5.47	5.08	4.32
7.0	6.977	6.889	6.79	6.51	6.13	5.57	4.58
8.0	7.959	7.81	7.63	7.19	6.65	5.93	4.75
8.5(= $\sigma_y$ )	8.446	8.25	8.02	7.49	6.86	6.06	4.82
9.0	8.929	8.67	8.39	7.76	7.04	6.17	4.87
10.0	9.88	9.46	9.05	8.19	7.32	6.34	4.95
11.0	10.80	10.16	9.59	8.51	7.51	6.45	4.998
12.0	11.68	10.75	10.01	8.73	7.64	6.52	5.035
13.0	12.49	11.22	10.31	8.89	7.72	6.57	5.063
14.0	13.22	11.57	10.53	8.99	7.78	6.60	5.085

Table 2.2.2 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr						
	$t=1 \times 10^{-2}$ hr	$2 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-2}$	0.1	0.2	0.3	0.5
0.1	0.0965	0.0932	0.0839	0.0706	0.0508	0.0374	0.0218
0.2	0.1926	0.1856	0.1662	0.1390	0.0991	0.0725	0.0422
0.4	0.384	0.368	0.326	0.269	0.1881	0.1363	0.0793
0.5	0.478	0.458	0.403	0.330	0.229	0.1653	0.0963
0.6	0.573	0.547	0.479	0.389	0.268	0.1924	0.1122
0.8	0.759	0.722	0.624	0.500	0.338	0.242	0.1415
1.0	0.943	0.892	0.761	0.601	0.401	0.285	0.1679
1.5	1.389	1.293	1.066	0.813	0.526	0.372	0.224
2.0	1.807	1.651	1.313	0.972	0.618	0.438	0.270
3.0	2.53	2.22	1.652	1.175	0.737	0.530	0.348
4.0	3.06	2.58	1.839	1.286	0.813	0.599	0.416
5.0	3.41	2.79	1.942	1.354	0.870	0.658	0.480
6.0	3.63	2.91	2.01	1.404	0.921	0.713	0.543
7.0	3.77	2.99	2.05	1.446	0.968	0.767	0.606
8.0	3.87	3.05	2.09	1.483	1.014	0.820	0.667
8.5 ( $=\sigma_y$ )	3.90	3.07	2.105	1.501	1.037	0.846	0.698
9.0	3.927	3.085	2.120	1.519	1.059	0.872	0.729
10.0	3.969	3.114	2.148	1.553	1.104	0.924	0.789
11.0	4.000	3.139	2.174	1.586	1.148	0.976	0.848
12.0	4.024	3.160	2.200	1.619	1.192	1.027	0.906
13.0	4.044	3.179	2.224	1.651	1.236	1.077	0.963
14.0	4.061	3.197	2.248	1.684	1.279	1.127	1.018

Table 2.2.2 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr					
	t=0.7hr	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0
0.1	0.01440	0.0099	0.0076	0.0074	0.0071	0.0066
0.2	0.0281	0.01948	0.01527	0.01482	0.01425	0.01319
0.4	0.0534	0.0380	0.0306	0.0300	0.0293	0.0279
0.5	0.0653	0.0469	0.0383	0.0376	0.0368	0.0352
0.6	0.0766	0.0557	0.0459	0.0451	0.0442	0.0424
0.8	0.0980	0.0728	0.0612	0.0602	0.0589	0.0565
1.0	0.1179	0.0894	0.0764	0.0751	0.0735	0.0704
1.5	0.1630	0.1292	0.1143	0.1122	0.1094	0.1040
2.0	0.204	0.1676	0.1519	0.1487	0.1442	0.1357
3.0	0.278	0.242	0.226	0.220	0.210	0.1930
4.0	0.348	0.315	0.299	0.287	0.270	0.242
5.0	0.417	0.386	0.370	0.351	0.323	0.281
6.0	0.485	0.456	0.438	0.409	0.370	0.313
7.0	0.552	0.526	0.504	0.462	0.409	0.339
8.0	0.618	0.593	0.566	0.509	0.442	0.359
8.5(= $\sigma_y$ )	0.650	0.626	0.595	0.531	0.457	0.367
9.0	0.682	0.658	0.624	0.551	0.470	0.374
10.0	0.745	0.720	0.677	0.587	0.492	0.386
11.0	0.807	0.780	0.727	0.618	0.511	0.396
12.0	0.866	0.837	0.772	0.645	0.526	0.403
13.0	0.923	0.890	0.813	0.668	0.539	0.409
14.0	0.977	0.940	0.850	0.688	0.549	0.414



Table 2.2.2 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr					
	t=50.0hr	1×10 <sup>2</sup>	2×10 <sup>2</sup>	3×10 <sup>2</sup>	5×10 <sup>2</sup>	1×10 <sup>3</sup>
0.1	0.0052	0.0035	0.0016	0.0008	0.0002	<1×10 <sup>-5</sup>
0.2	0.01046	0.0071	0.0033	0.0015	0.0003	<1×10 <sup>-5</sup>
0.4	0.0240	0.01793	0.0084	0.0039	0.0008	<1×10 <sup>-4</sup>
0.5	0.0307	0.0240	0.01237	0.0057	0.0012	<1×10 <sup>-4</sup>
0.6	0.0373	0.0298	0.01713	0.0080	0.0017	<1×10 <sup>-4</sup>
0.8	0.0499	0.0405	0.0256	0.01363	0.0029	<1×10 <sup>-4</sup>
1.0	0.0620	0.0504	0.0329	0.01971	0.0043	<1×10 <sup>-4</sup>
1.5	0.0901	0.0721	0.0475	0.0308	0.0084	0.0002
2.0	0.1149	0.0899	0.0583	0.0384	0.01237	0.0003
3.0	0.1553	0.1159	0.0725	0.0477	0.01813	0.0004
4.0	0.1850	0.1328	0.0807	0.0528	0.0211	0.0005
5.0	0.206	0.1439	0.0857	0.0559	0.0227	0.0005
6.0	0.222	0.1513	0.0889	0.0577	0.0237	0.0005
7.0	0.233	0.1563	0.0910	0.0589	0.0244	0.0006
8.0	0.241	0.1598	0.0924	0.0598	0.0248	0.0006
8.5(= $\sigma_y$ )	0.244	0.1612	0.0929	0.0601	0.0249	0.0006
9.0	0.247	0.1623	0.0934	0.0603	0.0251	0.0006
10.0	0.251	0.1642	0.0941	0.0608	0.0253	0.0006
11.0	0.2543	0.1655	0.0947	0.0611	0.0254	0.0006
12.0	0.2569	0.1665	0.0951	0.0613	0.0256	0.0006
13.0	0.2588	0.1673	0.0954	0.0615	0.0256	0.0006
14.0	0.2604	0.1680	0.0956	0.0616	0.0257	0.0006

Table 2.2.3 Relaxation data at temperature T = 925.0°C

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr						
	t=1×10 <sup>-4</sup> hr	5×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	2×10 <sup>-3</sup>	5×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-2</sup>
0.1	0.099988	0.09994	0.09989	0.09977	0.09943	0.0989	0.0978
0.2	0.19998	0.19988	0.19976	0.19952	0.19880	0.1976	0.1953
0.4	0.39995	0.39973	0.3995	0.3989	0.3973	0.3947	0.389
0.5	0.49993	0.49964	0.4993	0.4986	0.4965	0.493	0.486
0.6	0.5999	0.5995	0.5991	0.5982	0.5955	0.591	0.582
0.8	0.7999	0.7993	0.7986	0.7973	0.7933	0.787	0.774
1.0	0.9998	0.9990	0.9981	0.9962	0.9906	0.981	0.963
1.5	1.4996	1.4981	1.4962	1.4923	1.4810	1.462	1.427
2.0	1.9993	1.9965	1.9930	1.9861	1.966	1.933	1.870
3.0	2.998	2.990	2.980	2.961	2.91	2.82	2.67
4.0	3.995	3.975	3.951	3.90	3.78	3.59	3.29
5.0	4.989	4.944	4.890	4.79	4.53	4.19	3.72
6.0	5.978	5.894	5.79	5.61	5.17	4.65	4.01
7.0	6.959	6.81	6.63	6.34	5.68	4.98	4.20
8.0	7.926	7.66	7.38	6.93	6.05	5.21	4.32
9.0	8.872	8.44	8.01	7.39	6.31	5.36	4.39
9.7(= $\sigma_y$ )	9.514	8.92	8.38	7.64	6.43	5.43	4.43
10.0	9.783	9.11	8.52	7.74	6.48	5.45	4.442
11.0	10.646	9.67	8.90	7.98	6.59	5.51	4.476
12.0	11.439	10.10	9.18	8.13	6.66	5.553	4.500
13.0	12.14	10.42	9.37	8.24	6.707	5.582	4.520
14.0	12.75	10.66	9.50	8.31	6.742	5.604	4.536
15.0	13.24	10.82	9.59	8.36	6.767	5.621	4.550

Table 2.2.3 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr						
	t=5×10 <sup>-2</sup> hr	0.1	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5
0.1	0.0945	0.0893	0.0799	0.0579	0.0471	0.0352	0.0228
0.2	0.1884	0.1776	0.1580	0.1132	0.0917	0.0683	0.0442
0.4	0.374	0.351	0.309	0.216	0.1736	0.1283	0.0831
0.5	0.466	0.435	0.381	0.264	0.211	0.1554	0.1007
0.6	0.557	0.518	0.451	0.309	0.246	0.1809	0.1173
0.8	0.736	0.680	0.585	0.392	0.310	0.227	0.1477
1.0	0.912	0.836	0.710	0.467	0.367	0.268	0.1749
1.5	1.329	1.191	0.981	0.617	0.480	0.349	0.232
2.0	1.707	1.493	1.193	0.725	0.562	0.410	0.279
3.0	2.32	1.929	1.470	0.862	0.669	0.498	0.355
4.0	2.71	2.18	1.616	0.942	0.739	0.564	0.422
5.0	2.95	2.31	1.697	0.998	0.795	0.622	0.484
6.0	3.08	2.39	1.749	1.044	0.844	0.676	0.545
7.0	3.17	2.44	1.789	1.087	0.892	0.730	0.606
8.0	3.22	2.48	1.822	1.128	0.938	0.782	0.665
9.0	3.258	2.506	1.851	1.167	0.983	0.834	0.724
9.7(= $\sigma_y$ )	3.277	2.523	1.870	1.194	1.014	0.870	0.765
10.0	3.285	2.530	1.878	1.206	1.028	0.885	0.782
11.0	3.306	2.551	1.904	1.244	1.072	0.936	0.839
12.0	3.324	2.571	1.929	1.283	1.116	0.987	0.894
13.0	3.341	2.590	1.954	1.320	1.160	1.036	0.948
14.0	3.356	2.608	1.979	1.358	1.203	1.085	1.001
15.0	3.370	2.626	2.003	1.395	1.246	1.132	1.051

Table 2.2.3 (continud)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr					
	t=2.0hr	3.0	5.0	10.0	20.0	50.0
0.1	0.01602	0.01014	0.0077	0.0074	0.0072	0.0067
0.2	0.0311	0.01999	0.01547	0.01482	0.01445	0.01342
0.4	0.0590	0.0389	0.0309	0.0299	0.0294	0.0281
0.5	0.0719	0.0479	0.0385	0.0373	0.0368	0.0353
0.6	0.0842	0.0568	0.0462	0.0448	0.0442	0.0425
0.8	0.1071	0.0740	0.0614	0.0598	0.0590	0.0566
1.0	0.1282	0.0906	0.0765	0.0747	0.0736	0.0706
1.5	0.1750	0.1303	0.1140	0.1117	0.1098	0.1044
2.0	0.216	0.1683	0.1512	0.1483	0.1452	0.1367
3.0	0.290	0.241	0.225	0.220	0.213	0.1957
4.0	0.358	0.313	0.297	0.290	0.277	0.246
5.0	0.424	0.383	0.368	0.356	0.336	0.289
6.0	0.490	0.452	0.436	0.418	0.388	0.323
7.0	0.554	0.519	0.501	0.476	0.434	0.351
8.0	0.618	0.585	0.564	0.528	0.474	0.373
9.0	0.680	0.648	0.623	0.576	0.508	0.390
9.7(= $\sigma_y$ )	0.723	0.691	0.661	0.607	0.528	0.400
10.0	0.741	0.709	0.677	0.619	0.536	0.403
11.0	0.800	0.766	0.728	0.656	0.560	0.414
12.0	0.856	0.821	0.775	0.689	0.580	0.422
13.0	0.911	0.872	0.817	0.718	0.597	0.429
14.0	0.963	0.919	0.855	0.742	0.611	0.434
15.0	1.012	0.963	0.889	0.764	0.622	0.438

Table 2.2.3 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr					
	t=1×10 <sup>2</sup>	2×10 <sup>2</sup>	5×10 <sup>2</sup>	1×10 <sup>3</sup>	2×10 <sup>3</sup>	3×10 <sup>3</sup>
0.1	0.0059	0.0046	0.0022	0.0006	<1×10 <sup>-4</sup>	
0.2	0.01186	0.0093	0.0044	0.0013	0.0001	<1×10 <sup>-5</sup>
0.4	0.0259	0.0219	0.01119	0.0032	0.0003	<1×10 <sup>-4</sup>
0.5	0.0329	0.0283	0.01637	0.0048	0.0004	<1×10 <sup>-4</sup>
0.6	0.0397	0.0345	0.0214	0.0066	0.0006	<1×10 <sup>-4</sup>
0.8	0.0530	0.0463	0.0304	0.01128	0.0010	<1×10 <sup>-4</sup>
1.0	0.0659	0.0575	0.0384	0.01672	0.0014	0.0001
1.5	0.0964	0.0828	0.0547	0.0271	0.0027	0.0002
2.0	0.1243	0.1045	0.0670	0.0339	0.0039	0.0003
3.0	0.1720	0.1382	0.0836	0.0421	0.0058	0.0005
4.0	0.209	0.1615	0.0934	0.0465	0.0069	0.0006
5.0	0.237	0.1775	0.0993	0.0491	0.0076	0.0006
6.0	0.258	0.1884	0.1031	0.0506	0.0081	0.0007
7.0	0.274	0.1960	0.1056	0.0516	0.0084	0.0007
8.0	0.285	0.201	0.1073	0.0523	0.0086	0.0007
9.0	0.294	0.205	0.1085	0.0527	0.0087	0.0007
9.7(= $\sigma_y$ )	0.299	0.2073	0.1091	0.0530	0.0088	0.0007
10.0	0.301	0.2080	0.1093	0.0531	0.0088	0.0007
11.0	0.305	0.2101	0.1100	0.0533	0.0089	0.0008
12.0	0.3092	0.2117	0.1104	0.0535	0.0090	0.0008
13.0	0.3121	0.2129	0.1108	0.0536	0.0090	0.0008
14.0	0.3144	0.2139	0.1111	0.0537	0.0090	0.0008
15.0	0.3162	0.2146	0.1113	0.0538	0.0091	0.0008

Table 2.2.4 Relaxation data at temperature T = 900°C

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr						
	t=1×10 <sup>-4</sup> hr	5×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	2×10 <sup>-3</sup>	5×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-2</sup>
0.1	0.099995	0.09998	0.09996	0.09993	0.0998	0.0996	0.0993
0.2	0.199992	0.19996	0.19992	0.1998	0.1996	0.1992	0.1985
0.5	0.49997	0.49987	0.49976	0.4995	0.4989	0.4977	0.495
1.0	0.99993	0.9997	0.9994	0.9988	0.9969	0.994	0.988
2.0	1.9998	1.9989	1.9977	1.9955	1.989	1.978	1.956
4.0	3.998	3.992	3.983	3.967	3.92	3.84	3.71
5.0	4.996	4.980	4.961	4.923	4.82	4.66	4.39
6.0	5.992	5.961	5.924	5.85	5.65	5.37	4.94
7.0	6.985	6.927	6.86	6.73	6.39	5.96	5.35
8.0	7.973	7.87	7.74	7.52	7.00	6.39	5.63
9.0	8.951	8.77	8.56	8.22	7.47	6.70	5.81
10.0	9.916	9.61	9.29	8.79	7.82	6.91	5.92
10.9(= $\sigma_y$ )	10.766	10.31	9.86	9.20	8.04	7.04	5.99
12.0	11.770	11.05	10.42	9.58	8.23	7.14	6.04
13.0	12.635	11.61	10.81	9.82	8.34	7.20	6.077
14.0	13.44	12.06	11.10	9.98	8.42	7.236	6.100
15.0	14.15	12.40	11.30	10.10	8.47	7.264	6.117
16.0	14.77	12.65	11.44	10.17	8.501	7.283	6.130
17.0	15.27	12.82	11.54	10.23	8.525	7.298	6.141

Table 2.2.4 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr					
	$t=5 \times 10^{-2}$ hr	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
0.1	0.0982	0.0964	0.0930	0.0835	0.0701	0.0501
0.2	0.1962	0.1925	0.1853	0.1656	0.1380	0.976
0.5	0.489	0.478	0.457	0.402	0.327	0.225
1.0	0.970	0.942	0.889	0.756	0.594	0.394
2.0	1.893	1.799	1.638	1.294	0.953	0.602
4.0	3.38	2.99	2.50	1.777	1.242	0.785
5.0	3.84	3.29	2.68	1.863	1.299	0.836
6.0	4.16	3.48	2.78	1.920	1.346	0.886
7.0	4.35	3.58	2.84	1.954	1.380	0.928
8.0	4.48	3.65	2.88	1.983	1.413	0.970
9.0	4.56	3.691	2.909	2.009	1.444	1.013
10.0	4.61	3.719	2.931	2.032	1.475	1.054
10.9(= $\sigma_y$ )	4.640	3.739	2.947	2.052	1.502	1.091
12.0	4.666	3.757	2.965	2.076	1.534	1.136
13.0	4.684	3.771	2.980	2.096	1.563	1.176
14.0	4.698	3.783	2.994	2.117	1.592	1.216
15.0	4.710	3.795	3.007	2.137	1.621	1.256
16.0	4.720	3.805	3.020	2.157	1.649	1.294
17.0	4.730	3.816	3.034	2.177	1.677	1.332

Table 2.2.4 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr					
	t=5.0hr	10.0	20.0	50.0	1×10 <sup>2</sup>	2×10 <sup>2</sup>
0.1	0.0211	0.0095	0.0077	0.0073	0.0071	0.0066
0.2	0.0409	0.01884	0.01535	0.01467	0.01413	0.01310
0.5	0.0933	0.0455	0.0383	0.0371	0.0363	0.0348
1.0	0.1626	0.0867	0.0760	0.0740	0.0723	0.0693
2.0	0.261	0.1623	0.1478	0.1447	0.1401	0.1316
4.0	0.401	0.305	0.292	0.279	0.261	0.232
5.0	0.463	0.374	0.359	0.338	0.310	0.268
6.0	0.524	0.443	0.425	0.394	0.353	0.296
7.0	0.584	0.509	0.486	0.442	0.388	0.318
8.0	0.643	0.573	0.544	0.484	0.416	0.335
9.0	0.702	0.634	0.598	0.521	0.440	0.347
10.0	0.759	0.693	0.647	0.553	0.459	0.357
10.9(= $\sigma_y$ )	0.809	0.743	0.687	0.577	0.472	0.364
12.0	0.869	0.800	0.731	0.601	0.486	0.370
13.0	0.922	0.848	0.766	0.620	0.495	0.375
14.0	0.972	0.892	0.797	0.636	0.503	0.3784
15.0	1.020	0.932	0.824	0.649	0.510	0.3812
16.0	1.066	0.968	0.848	0.660	0.515	0.3835
17.0	1.109	1.001	0.869	0.669	0.519	0.3854



Table 2.2.4 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr					
	$t=5 \times 10^2$ hr	$1 \times 10^3$	$2 \times 10^3$	$3 \times 10^3$	$5 \times 10^3$	$1 \times 10^4$
0.1	0.0052	0.0036	0.0017	0.0008	0.0002	$<1 \times 10^{-5}$
0.2	0.01046	0.0072	0.0034	0.0016	0.0004	$<1 \times 10^{-5}$
0.5	0.0304	0.0239	0.01256	0.0059	0.0013	$<1 \times 10^{-4}$
1.0	0.0610	0.0496	0.0325	0.01966	0.0045	0.0001
2.0	0.1110	0.0866	0.0561	0.0370	0.01204	0.0003
4.0	0.1760	0.1257	0.0763	0.0500	0.01992	0.0005
5.0	0.1945	0.1351	0.0805	0.0526	0.0213	0.0005
6.0	0.208	0.1413	0.0832	0.0542	0.0222	0.0006
7.0	0.217	0.1454	0.0849	0.0551	0.0227	0.0006
8.0	0.223	0.1482	0.0860	0.0558	0.0231	0.0006
9.0	0.228	0.1502	0.0868	0.0563	0.0233	0.0006
10.0	0.231	0.1516	0.0874	0.0566	0.0235	0.0006
10.9(= $\sigma_y$ )	0.2336	0.1526	0.0877	0.0568	0.0236	0.0006
12.0	0.2358	0.1534	0.0881	0.0570	0.0237	0.0006
13.0	0.2373	0.1540	0.0883	0.0571	0.0238	0.0006
14.0	0.2384	0.1545	0.0885	0.0572	0.0238	0.0006
15.0	0.2393	0.1549	0.0886	0.0573	0.0238	0.0006
16.0	0.2400	0.1551	0.0887	0.0574	0.0239	0.0006
17.0	0.2406	0.1554	0.0888	0.0574	0.0239	0.0006

Table 2.2.5 Relaxation data at temperature T = 850.0°C

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr					
	$t=1 \times 10^{-4}$ hr	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$
0.1					0.09998	0.09996
0.2					0.19996	0.19992
0.5			0.49998	0.49995	0.49988	0.49977
1.0			0.99994	0.99988	0.99969	0.99938
2.0		1.99988	1.99976	1.99953	1.9988	1.9976
4.0		3.99905	3.9981	3.9962	3.9906	3.981
5.0	4.9995	4.9977	4.9954	4.9907	4.977	4.954
6.0	5.9990	5.9952	5.9904	5.981	5.953	5.907
8.0	7.9963	7.982	7.964	7.928	7.83	7.67
10.0	9.988	9.941	9.88	9.77	9.48	9.08
11.0	10.979	10.899	10.80	10.63	10.18	9.61
12.0	11.966	11.83	11.68	11.41	10.76	10.02
13.0	12.944	12.73	12.50	12.10	11.23	10.33
13.2 (= $\sigma_y$ )	13.138	12.91	12.65	12.22	11.31	10.38
14.0	13.910	13.59	13.24	12.69	11.59	10.54
15.0	14.859	14.37	13.89	13.16	11.86	10.69
16.0	15.781	15.08	14.43	13.54	12.05	10.79
17.0	16.67	15.68	14.87	13.81	12.18	10.86
18.0	17.50	16.18	15.20	14.01	12.27	10.91
19.0	18.25	16.57	15.44	14.15	12.33	10.944
20.0	18.91	16.85	15.61	14.25	12.37	10.967

Table 2.2.5 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr						
	$t=2 \times 10^{-2}$ hr	$5 \times 10^{-2}$	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
0.1	0.09993	0.09982	0.09963	0.09926	0.0982	0.0964	0.0929
0.2	0.19984	0.19961	0.19922	0.1984	0.1961	0.1923	0.1850
0.5	0.49954	0.4988	0.4977	0.4954	0.489	0.477	0.456
1.0	0.9988	0.9969	0.9938	0.988	0.970	0.941	0.887
2.0	1.9953	1.988	1.977	1.954	1.889	1.792	1.627
4.0	3.963	3.91	3.83	3.68	3.33	2.93	2.44
5.0	4.911	4.79	4.61	4.32	3.75	3.19	2.59
6.0	5.82	5.59	5.27	4.80	4.00	3.34	2.67
8.0	7.40	6.79	6.13	5.35	4.25	3.47	2.75
10.0	8.49	7.44	6.52	5.56	4.340	3.522	2.790
11.0	8.85	7.61	6.61	5.61	4.362	3.537	2.805
12.0	9.10	7.73	6.67	5.644	4.377	3.549	2.818
13.0	9.28	7.81	6.71	5.665	4.389	3.559	2.830
13.2(= $\sigma_y$ )	9.30	7.82	6.72	5.668	4.391	3.561	2.832
14.0	9.39	7.851	6.733	5.677	4.397	3.568	2.841
15.0	9.47	7.884	6.750	5.688	4.405	3.577	2.852
16.0	9.52	7.906	6.762	5.696	4.412	3.585	2.863
17.0	9.560	7.921	6.772	5.703	4.419	3.593	2.874
18.0	9.585	7.933	6.779	5.709	4.425	3.601	2.885
19.0	9.602	7.941	6.785	5.714	4.431	3.608	2.896
20.0	9.614	7.947	6.790	5.719	4.437	3.616	2.906

Table 2.2.5 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr						
	t=5.0hr	10.0	20.0	50.0	1×10 <sup>2</sup>	2×10 <sup>2</sup>	5×10 <sup>2</sup>
0.1	0.0832	0.0696	0.0494	0.0205	0.0092	0.0072	0.0071
0.2	0.1649	0.1369	0.0962	0.0397	0.01818	0.01449	0.01415
0.5	0.400	0.325	0.222	0.0905	0.0439	0.0363	0.0357
1.0	0.752	0.588	0.387	0.1576	0.0838	0.0724	0.0714
2.0	1.280	0.938	0.589	0.253	0.1578	0.1441	0.1415
4.0	1.727	1.205	0.760	0.389	0.297	0.284	0.273
5.0	1.803	1.259	0.810	0.449	0.365	0.351	0.332
6.0	1.848	1.298	0.855	0.509	0.431	0.415	0.386
8.0	1.905	1.362	0.939	0.625	0.559	0.532	0.476
10.0	1.948	1.420	1.019	0.738	0.676	0.632	0.543
11.0	1.967	1.448	1.059	0.792	0.729	0.675	0.568
12.0	1.986	1.475	1.098	0.845	0.779	0.713	0.589
13.0	2.005	1.503	1.136	0.895	0.825	0.746	0.607
13.2(= $\sigma_y$ )	2.009	1.508	1.144	0.905	0.834	0.753	0.610
14.0	2.023	1.530	1.174	0.944	0.867	0.776	0.621
15.0	2.042	1.556	1.212	0.990	0.905	0.801	0.633
16.0	2.060	1.583	1.248	1.033	0.939	0.823	0.643
17.0	2.078	1.609	1.284	1.073	0.970	0.842	0.651
18.0	2.095	1.634	1.319	1.111	0.997	0.858	0.658
19.0	2.113	1.660	1.353	1.146	1.021	0.872	0.663
20.0	2.130	1.685	1.387	1.178	1.043	0.884	0.668

Table 2.2.5 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr						
	t=1×10 <sup>3</sup> hr	2×10 <sup>3</sup>	5×10 <sup>3</sup>	1×10 <sup>4</sup>	2×10 <sup>4</sup>	5×10 <sup>4</sup>	1×10 <sup>5</sup>
0.1	0.0069	0.0065	0.0054	0.0040	0.0022	0.0004	<1×10 <sup>-4</sup>
0.2	0.01374	0.01295	0.01084	0.0081	0.0045	0.0008	<1×10 <sup>-4</sup>
0.5	0.0351	0.0339	0.0305	0.0253	0.01595	0.0027	0.0001
1.0	0.0702	0.0677	0.0611	0.0516	0.0369	0.0091	0.0005
2.0	0.1377	0.1306	0.1128	0.0912	0.0632	0.0218	0.0012
4.0	0.257	0.231	0.1803	0.1331	0.0855	0.0303	0.0020
5.0	0.307	0.268	0.1999	0.1432	0.0902	0.0318	0.0022
6.0	0.349	0.297	0.213	0.1498	0.0931	0.0327	0.0023
8.0	0.413	0.336	0.229	0.1570	0.0961	0.0336	0.0024
10.0	0.454	0.358	0.237	0.1604	0.0974	0.0340	0.0024
11.0	0.468	0.365	0.2400	0.1614	0.0979	0.0342	0.0024
12.0	0.480	0.370	0.2418	0.1622	0.0982	0.0343	0.0024
13.0	0.489	0.3745	0.2432	0.1628	0.0984	0.0343	0.0025
13.2(= $\sigma_y$ )	0.490	0.3752	0.2434	0.1629	0.0984	0.0343	0.0025
14.0	0.496	0.3778	0.2443	0.1632	0.0986	0.0344	0.0025
15.0	0.502	0.3804	0.2451	0.1635	0.0987	0.0344	0.0025
16.0	0.506	0.3824	0.2458	0.1638	0.0988	0.0344	0.0025
17.0	0.5102	0.3841	0.2463	0.1640	0.0989	0.0345	0.0025
18.0	0.5133	0.3854	0.2467	0.1642	0.0989	0.0345	0.0025
19.0	0.5158	0.3865	0.2470	0.1643	0.0990	0.0345	0.0025
20.0	0.5179	0.3874	0.2473	0.1644	0.0990	0.0345	0.0025

Table 2.2.6 Relaxation data at temperature  $T = 800.0^{\circ}\text{C}$ 

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time $t$ hr					
	$t=1 \times 10^{-3}$ hr	$1 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-2}$	0.1	0.2
0.1		0.099996	0.099992	0.09998	0.09996	0.09992
0.2		0.199992	0.199984	0.19996	0.19992	0.19984
0.5		0.49997	0.49994	0.49987	0.49976	0.4995
1.0		0.99993	0.99987	0.99968	0.99936	0.9987
2.0		1.9998	1.9995	1.9988	1.9976	1.9952
4.0		3.9980	3.9959	3.9899	3.980	3.960
5.0	4.9995	4.9949	4.9898	4.975	4.950	4.90
6.0	5.9989	5.989	5.978	5.946	5.893	5.79
8.0	7.9954	7.955	7.911	7.787	7.60	7.29
10.0	9.984	9.850	9.71	9.35	8.89	8.24
12.0	11.954	11.582	11.24	10.48	9.67	8.72
13.0	12.924	12.346	11.86	10.87	9.91	8.84
14.0	13.879	13.02	12.36	11.15	10.07	8.93
15.0	14.810	13.59	12.76	11.36	10.17	8.982
15.7(= $\sigma_y$ )	15.442	13.93	12.98	11.46	10.23	9.010
16.0	15.708	14.06	13.06	11.50	10.25	9.019
17.0	16.559	14.42	13.28	11.59	10.297	9.044
18.0	17.35	14.69	13.43	11.66	10.331	9.061
19.0	18.06	14.89	13.54	11.71	10.354	9.072
20.0	18.67	15.03	13.61	11.737	10.369	9.081
21.0	19.18	15.12	13.66	11.758	10.380	9.087
22.0	19.57	15.19	13.699	11.773	10.388	9.092
23.0	19.87	15.23	13.723	11.783	10.394	9.095

Table 2.2.6 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr						
	t=0.5hr	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	50.0
0.1	0.09981	0.0996	0.0992	0.0981	0.0963	0.0927	0.0829
0.2	0.19960	0.1992	0.1984	0.1960	0.1922	0.1847	0.1643
0.5	0.4988	0.4976	0.495	0.488	0.477	0.456	0.398
1.0	0.9968	0.9937	0.987	0.969	0.940	0.885	0.749
2.0	1.988	1.976	1.953	1.888	1.789	1.622	1.273
4.0	3.90	3.82	3.66	3.30	2.90	2.41	1.708
5.0	4.77	4.58	4.28	3.69	3.14	2.55	1.778
6.0	5.54	5.20	4.71	3.92	3.27	2.62	1.820
8.0	6.62	5.95	5.17	4.12	3.38	2.69	1.873
10.0	7.15	6.25	5.33	4.19	3.42	2.72	1.913
12.0	7.37	6.356	5.390	4.214	3.440	2.748	1.950
13.0	7.42	6.383	5.404	4.223	3.448	2.759	1.968
14.0	7.451	6.400	5.414	4.230	3.456	2.769	1.985
15.0	7.474	6.412	5.422	4.236	3.463	2.780	2.003
15.7(= $\sigma_y$ )	7.485	6.418	5.426	4.240	3.468	2.787	2.015
16.0	7.489	6.420	5.428	4.242	3.470	2.790	2.020
17.0	7.499	6.426	5.433	4.247	3.477	2.800	2.037
18.0	7.506	6.431	5.437	4.252	3.484	2.810	2.055
19.0	7.512	6.435	5.441	4.257	3.491	2.820	2.072
20.0	7.516	6.438	5.444	4.262	3.497	2.830	2.088
21.0	7.520	6.441	5.448	4.266	3.504	2.839	2.105
22.0	7.523	6.444	5.451	4.271	3.510	2.849	2.121
23.0	7.525	6.447	5.454	4.275	3.517	2.858	2.138

Table 2.2.6 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr						
	$t=1 \times 10^2$ hr	$2 \times 10^2$	$5 \times 10^2$	$1 \times 10^3$	$2 \times 10^3$	$5 \times 10^3$	$1 \times 10^4$
0.1	0.0691	0.0487	0.01989	0.0089	0.0071	0.0070	0.0068
0.2	0.1359	0.0949	0.0385	0.01759	0.01415	0.01392	0.01367
0.5	0.322	0.219	0.0879	0.0425	0.0354	0.0350	0.0346
1.0	0.583	0.381	0.1533	0.0814	0.0707	0.0700	0.0692
2.0	0.930	0.581	0.247	0.1536	0.1408	0.1390	0.1365
4.0	1.190	0.748	0.380	0.290	0.278	0.271	0.259
5.0	1.242	0.798	0.440	0.357	0.345	0.331	0.312
6.0	1.279	0.841	0.498	0.423	0.409	0.388	0.358
8.0	1.342	0.924	0.614	0.550	0.529	0.484	0.430
10.0	1.398	1.004	0.727	0.669	0.633	0.557	0.477
12.0	1.453	1.082	0.834	0.775	0.719	0.609	0.508
13.0	1.479	1.121	0.885	0.822	0.755	0.629	0.518
14.0	1.506	1.158	0.935	0.866	0.786	0.646	0.527
15.0	1.532	1.196	0.981	0.906	0.814	0.659	0.534
15.7(= $\sigma_y$ )	1.550	1.222	1.013	0.932	0.831	0.667	0.538
16.0	1.558	1.233	1.026	0.942	0.838	0.670	0.539
17.0	1.584	1.269	1.067	0.974	0.858	0.679	0.5435
18.0	1.609	1.304	1.106	1.003	0.876	0.687	0.5470
19.0	1.634	1.338	1.142	1.029	0.891	0.693	0.5499
20.0	1.659	1.371	1.176	1.052	0.904	0.698	0.5523
21.0	1.684	1.403	1.206	1.072	0.915	0.703	0.5542
22.0	1.707	1.434	1.234	1.089	0.925	0.7063	0.5558
23.0	1.731	1.464	1.260	1.105	0.933	0.7094	0.5572



Table 2.2.6 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr						
	$t=2 \times 10^4$ hr	$5 \times 10^4$	$1 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	$3 \times 10^5$	$5 \times 10^5$	$1 \times 10^6$
0.1	0.0066	0.0059	0.0049	0.0034	0.0024	0.0011	0.0002
0.2	0.01318	0.01181	0.0098	0.0068	0.0047	0.0023	0.0004
0.5	0.0339	0.0317	0.0283	0.0221	0.01645	0.0080	0.0013
1.0	0.0676	0.0632	0.0567	0.0458	0.0371	0.0234	0.0041
2.0	0.1316	0.1190	0.1023	0.0788	0.0625	0.0408	0.01014
4.0	0.239	0.1974	0.1550	0.1093	0.0833	0.0529	0.01586
5.0	0.281	0.222	0.1686	0.1159	0.0874	0.0551	0.01691
6.0	0.314	0.239	0.1774	0.1199	0.0898	0.0564	0.01750
8.0	0.361	0.260	0.1871	0.1241	0.0924	0.0577	0.01808
10.0	0.387	0.270	0.1917	0.1260	0.0935	0.0582	0.01833
12.0	0.403	0.2754	0.1940	0.1270	0.0940	0.0585	0.01846
13.0	0.408	0.2771	0.1947	0.1273	0.0942	0.0586	0.01850
14.0	0.412	0.2784	0.1953	0.1275	0.0943	0.0587	0.01853
15.0	0.4150	0.2794	0.1957	0.1276	0.0944	0.0587	0.01855
15.7 (= $\sigma_y$ )	0.4168	0.2800	0.1959	0.1277	0.0945	0.0587	0.01856
16.0	0.4175	0.2802	0.1960	0.1278	0.0945	0.0588	0.01856
17.0	0.4194	0.2808	0.1963	0.1279	0.0946	0.0588	0.01858
18.0	0.4210	0.2813	0.1965	0.1280	0.0946	0.0588	0.01859
19.0	0.4222	0.2817	0.1966	0.1280	0.0946	0.0588	0.01860
20.0	0.4233	0.2821	0.1968	0.1281	0.0947	0.0588	0.01860
21.0	0.4241	0.2823	0.1969	0.1281	0.0947	0.0589	0.01861
22.0	0.4248	0.2826	0.1970	0.1282	0.0947	0.0589	0.01861
23.0	0.4254	0.2827	0.1970	0.1282	0.0947	0.0589	0.01862

Table 2.2.7 Relaxation data at temperature T = 700.0°C

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr						
	t=1×10 <sup>-3</sup> hr	5×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-2</sup>	2×10 <sup>-2</sup>	5×10 <sup>-2</sup>	0.1	0.2
0.5							
1.0							
2.0							
4.0							
5.0						4.9992	4.9984
6.0						5.9984	5.9968
8.0						7.9936	7.987
10.0						9.977	9.955
12.0						11.929	11.86
14.0			13.979	13.959	13.898	13.802	13.62
15.0			14.966	14.932	14.835	14.682	14.41
16.0	15.994	15.972	15.945	15.891	15.737	15.50	15.10
17.0	16.991	16.955	16.911	16.826	16.59	16.25	15.69
18.0(= $\sigma_y$ )	17.986	17.929	17.859	17.727	17.37	16.89	16.17
19.0	18.977	18.887	18.779	18.580	18.07	17.43	16.54
20.0	19.963	19.822	19.658	19.36	18.67	17.85	16.81
22.0	21.907	21.571	21.22	20.64	19.51	18.39	17.12
24.0	23.764	23.03	22.37	21.47	19.96	18.65	17.26
25.0	24.628	23.59	22.76	21.72	20.08	18.72	17.301
26.0	25.42	24.03	23.05	21.89	20.16	18.764	17.326
27.0	26.11	24.35	23.25	22.00	20.21	18.793	17.342
28.0	26.69	24.57	23.38	22.07	20.247	18.813	17.354
29.0	27.14	24.72	23.46	22.12	20.271	18.827	17.363
30.0	27.47	24.82	23.52	22.16	20.288	18.838	17.371

Table 2.2.7 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr					
	t=0.5hr	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0
0.5	0.49997	0.49995	0.49989	0.49973	0.4995	0.4989
1.0	0.99993	0.99986	0.9997	0.9993	0.9986	0.9972
2.0	1.9998	1.9995	1.9990	1.9975	1.995	1.990
4.0	3.9983	3.9966	3.993	3.983	3.966	3.93
5.0	4.9960	4.992	4.984	4.960	4.92	4.85
6.0	5.9919	5.984	5.968	5.92	5.85	5.71
8.0	7.968	7.938	7.88	7.71	7.47	7.08
10.0	9.89	9.79	9.60	9.14	8.58	7.86
12.0	11.67	11.39	10.94	10.04	9.16	8.19
14.0	13.17	12.59	11.79	10.49	9.41	8.32
15.0	13.76	13.01	12.06	10.61	9.48	8.354
16.0	14.24	13.32	12.24	10.69	9.52	8.375
17.0	14.60	13.54	12.36	10.74	9.542	8.388
18.0( $=\sigma_y$ )	14.87	13.69	12.44	10.776	9.559	8.398
19.0	15.05	13.79	12.49	10.798	9.571	8.404
20.0	15.18	13.86	12.526	10.812	9.579	8.409
22.0	15.32	13.932	12.564	10.829	9.588	8.416
24.0	15.38	13.964	12.582	10.838	9.595	8.421
25.0	15.398	13.973	12.587	10.841	9.597	8.423
26.0	15.410	13.980	12.591	10.844	9.599	8.425
27.0	15.418	13.985	12.595	10.846	9.601	8.427
28.0	15.424	13.989	12.598	10.848	9.603	8.429
29.0	15.429	13.993	12.601	10.850	9.605	8.431
30.0	15.434	13.996	12.603	10.852	9.607	8.433

Table 2.2.7 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr					
	t=50.0hr	$1 \times 10^2$	$2 \times 10^2$	$5 \times 10^2$	$1 \times 10^3$	$2 \times 10^3$
0.5	0.4973	0.495	0.489	0.474	0.449	0.405
1.0	0.9929	0.986	0.972	0.932	0.872	0.767
2.0	1.975	1.951	1.905	1.778	1.602	1.334
4.0	3.84	3.70	3.47	2.97	2.46	1.883
5.0	4.65	4.38	3.98	3.27	2.64	1.980
6.0	5.36	4.92	4.34	3.44	2.73	2.03
8.0	6.30	5.55	4.70	3.60	2.82	2.09
10.0	6.71	5.78	4.82	3.65	2.85	2.12
12.0	6.86	5.858	4.864	3.676	2.873	2.140
14.0	6.915	5.887	4.883	3.691	2.890	2.161
15.0	6.929	5.896	4.890	3.697	2.898	2.172
16.0	6.938	5.902	4.896	3.703	2.905	2.182
17.0	6.945	5.907	4.901	3.709	2.913	2.192
18.0( $=\sigma_y$ )	6.950	5.912	4.905	3.715	2.921	2.203
19.0	6.955	5.916	4.910	3.720	2.928	2.213
20.0	6.958	5.919	4.914	3.726	2.936	2.223
22.0	6.964	5.926	4.923	3.737	2.951	2.244
24.0	6.969	5.932	4.931	3.748	2.966	2.265
25.0	6.972	5.935	4.935	3.754	2.974	2.275
26.0	6.974	5.939	4.939	3.759	2.981	2.286
27.0	6.977	5.942	4.943	3.765	2.989	2.296
28.0	6.979	5.945	4.947	3.771	2.996	2.307
29.0	6.982	5.948	4.951	3.776	3.004	2.317
30.0	6.984	5.951	4.955	3.782	3.011	2.328

Table 2.2.7 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr					
	$t=3 \times 10^3$ hr	$5 \times 10^3$	$7 \times 10^3$	$1 \times 10^4$	$2 \times 10^4$	$5 \times 10^4$
0.5	0.366	0.302	0.250	0.1916	0.0863	0.0209
1.0	0.680	0.543	0.441	0.330	0.1458	0.0396
2.0	1.138	0.865	0.682	0.498	0.220	0.0734
4.0	1.537	1.119	0.867	0.631	0.298	0.1363
5.0	1.606	1.166	0.905	0.663	0.327	0.1672
6.0	1.646	1.195	0.931	0.688	0.353	0.1980
8.0	1.691	1.237	0.973	0.732	0.406	0.260
10.0	1.721	1.270	1.010	0.774	0.457	0.321
12.0	1.747	1.301	1.045	0.814	0.509	0.383
14.0	1.772	1.332	1.081	0.855	0.561	0.445
15.0	1.785	1.348	1.099	0.876	0.587	0.475
16.0	1.797	1.363	1.116	0.896	0.614	0.506
17.0	1.809	1.379	1.134	0.917	0.640	0.537
18.0(= $\sigma_y$ )	1.822	1.394	1.152	0.938	0.667	0.567
19.0	1.834	1.410	1.170	0.959	0.693	0.598
20.0	1.847	1.426	1.188	0.980	0.720	0.628
22.0	1.872	1.457	1.225	1.022	0.773	0.689
24.0	1.897	1.489	1.261	1.064	0.827	0.749
25.0	1.909	1.505	1.280	1.086	0.854	0.779
26.0	1.922	1.520	1.298	1.107	0.880	0.808
27.0	1.935	1.536	1.317	1.128	0.907	0.838
28.0	1.947	1.552	1.335	1.150	0.934	0.867
29.0	1.960	1.568	1.354	1.171	0.961	0.896
30.0	1.973	1.584	1.373	1.193	0.988	0.924

Table 2.2.7 (continued)

Initial Stress $\sigma_0$ kg/mm <sup>2</sup>	Residual Stress $\sigma$ kg/mm <sup>2</sup> at Time t hr					
	$t=1 \times 10^5$ hr	$2 \times 10^5$	$5 \times 10^5$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^8$
0.5	0.01583	0.01575	0.01572	0.01568	0.01489	0.0088
1.0	0.0316	0.0315	0.0315	0.0314	0.0304	0.0213
2.0	0.0632	0.0630	0.0629	0.0628	0.0607	0.0437
4.0	0.1261	0.1259	0.1257	0.1253	0.1182	0.0752
5.0	0.1576	0.1574	0.1570	0.1563	0.1450	0.0856
6.0	0.1890	0.1887	0.1881	0.1870	0.1702	0.0935
8.0	0.2518	0.2513	0.2499	0.2477	0.215	0.1037
10.0	0.3145	0.3136	0.311	0.307	0.251	0.1096
12.0	0.377	0.375	0.371	0.363	0.280	0.1130
14.0	0.439	0.436	0.429	0.417	0.302	0.1152
15.0	0.470	0.466	0.457	0.443	0.310	0.1159
16.0	0.500	0.496	0.485	0.468	0.318	0.1165
17.0	0.531	0.526	0.512	0.491	0.324	0.1170
18.0(= $\sigma_y$ )	0.561	0.555	0.539	0.514	0.330	0.1174
19.0	0.592	0.584	0.564	0.536	0.3343	0.1177
20.0	0.622	0.613	0.589	0.556	0.3383	0.1180
22.0	0.681	0.669	0.636	0.593	0.3448	0.1184
24.0	0.739	0.722	0.680	0.626	0.3496	0.1187
25.0	0.767	0.748	0.700	0.641	0.3515	0.1188
26.0	0.795	0.773	0.719	0.654	0.3532	0.1189
27.0	0.823	0.798	0.738	0.667	0.3546	0.1190
28.0	0.850	0.822	0.755	0.679	0.3559	0.1190
29.0	0.877	0.845	0.771	0.689	0.3570	0.1191
30.0	0.903	0.868	0.787	0.699	0.3580	0.1192

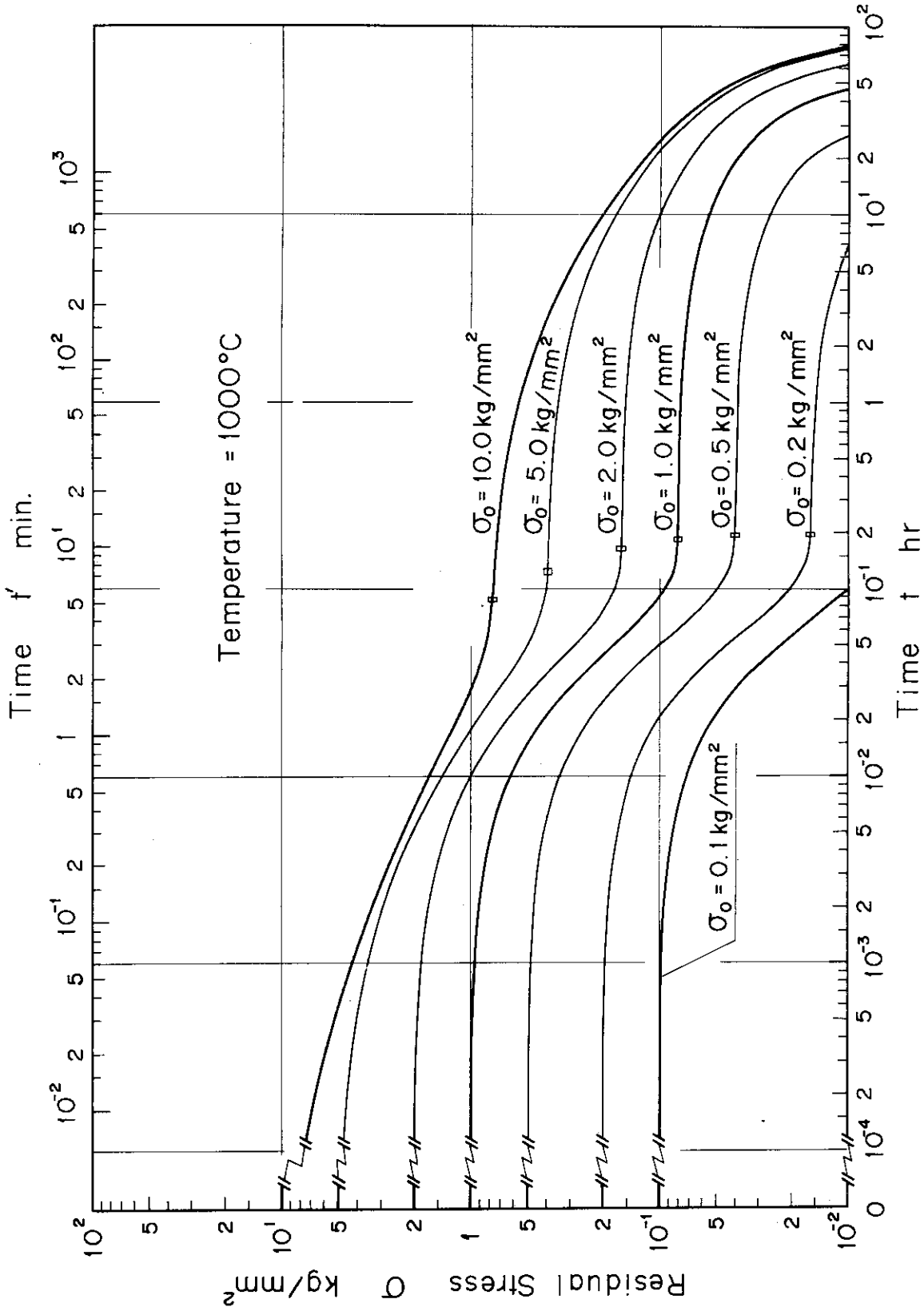


Fig. 2.2.1 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=1000 °C (log-log scale)

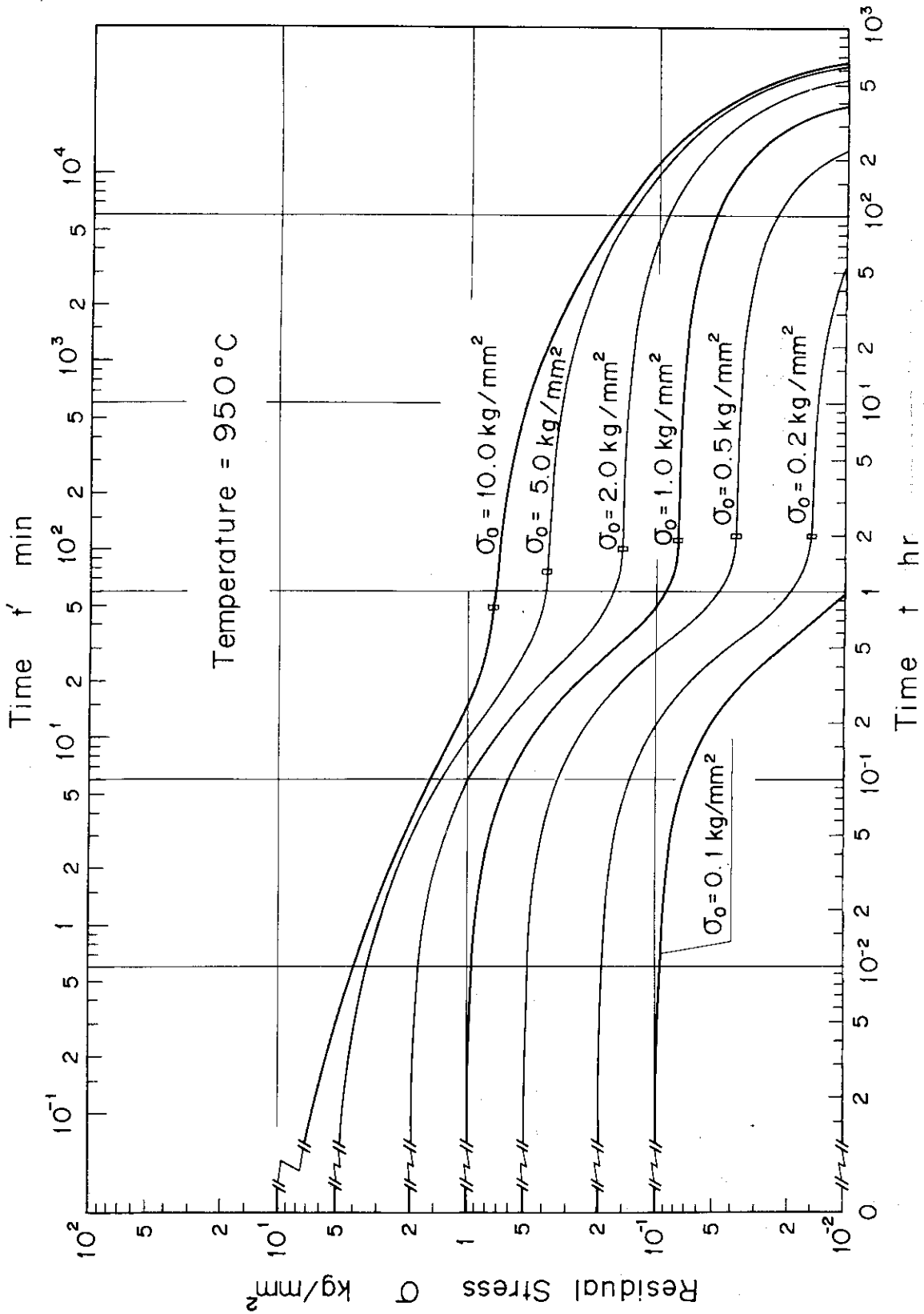


Fig. 2.2.2 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=950 °C (log-log scale)



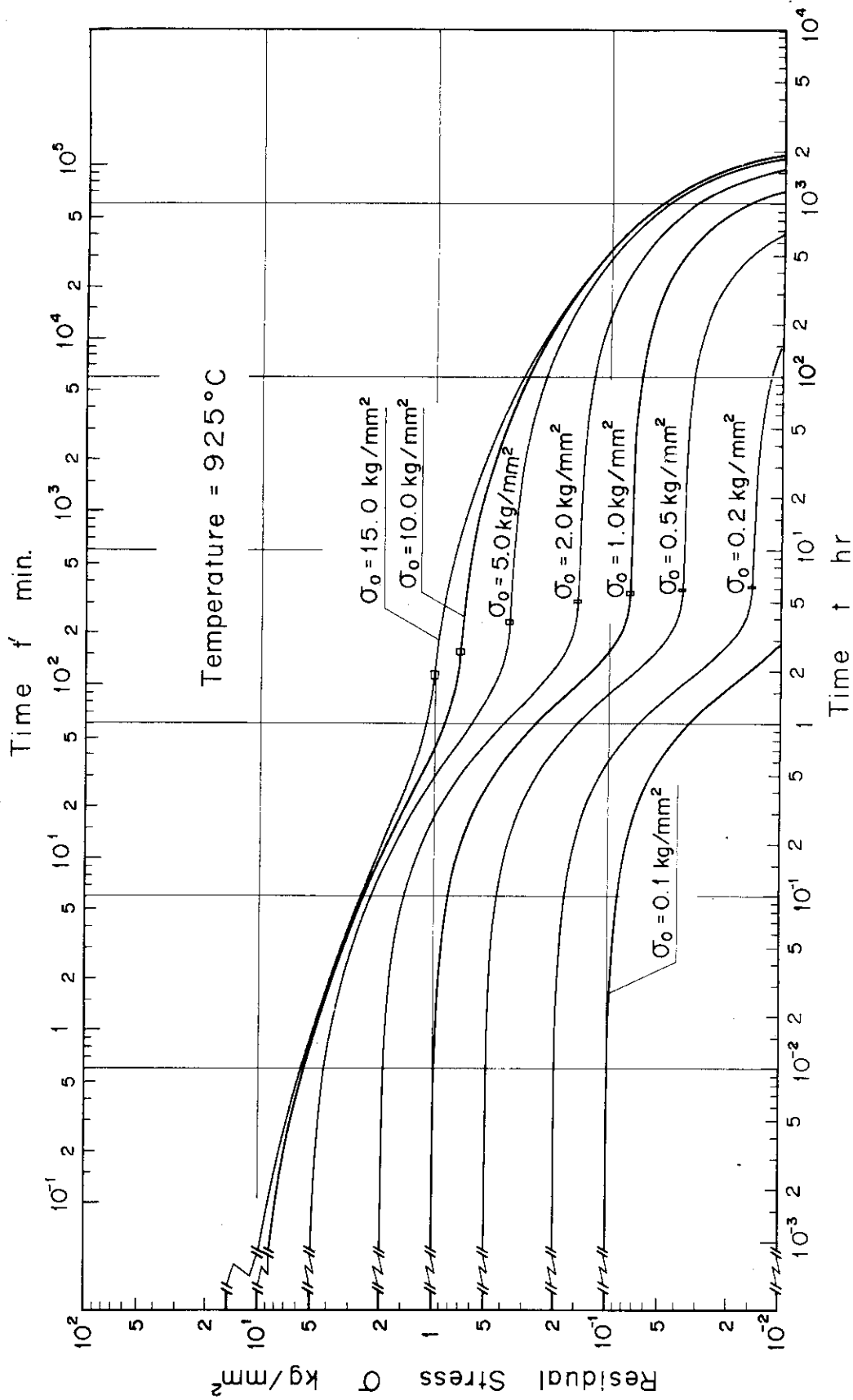


Fig. 2.2.3 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=925 °C (log-log scale)

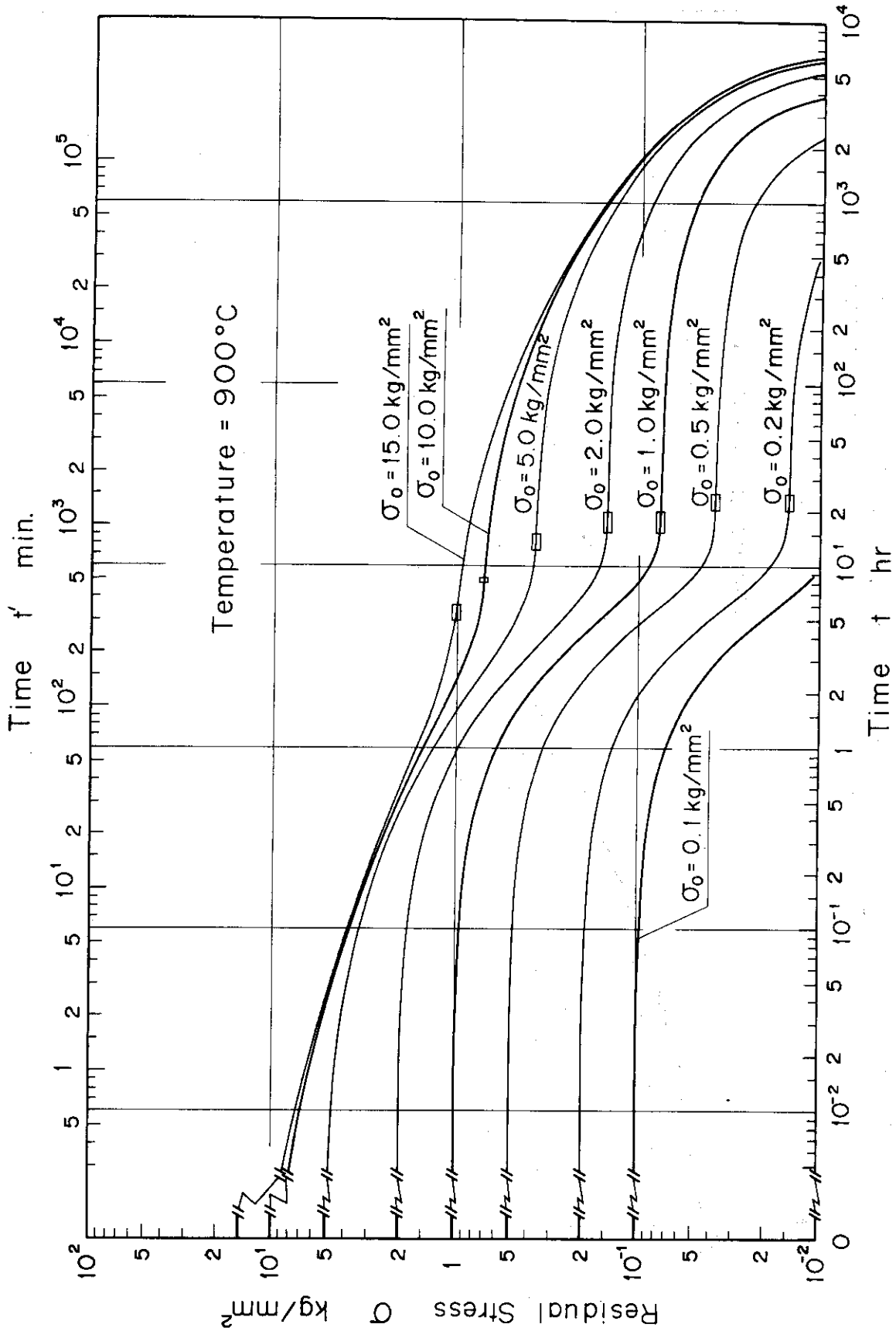


Fig. 2.2.4 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=900 °C (log-log scale)

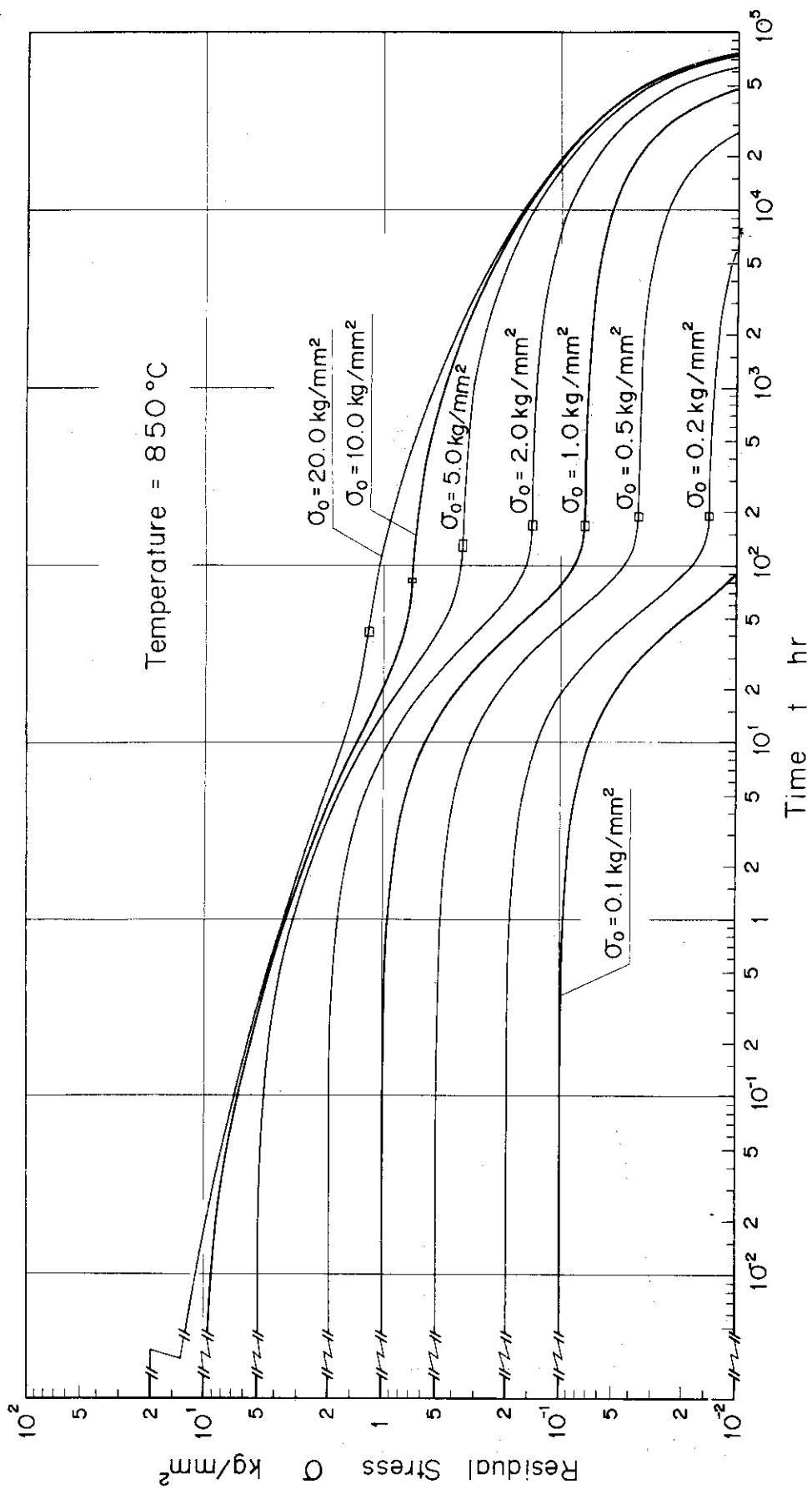


Fig. 2.2.5 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=850 °C (log-log scale)

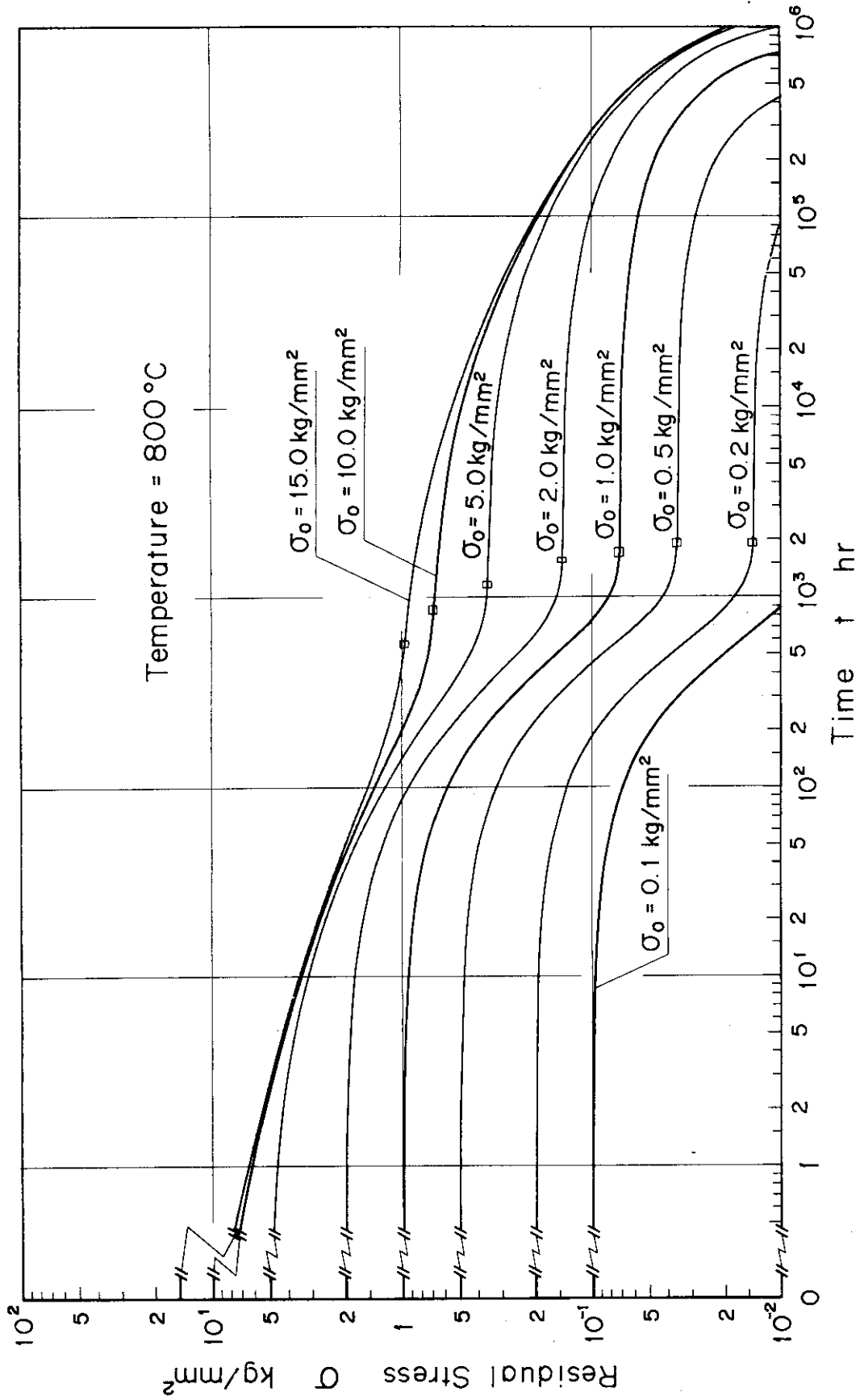


Fig. 2.2.6 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=800 °C (log-log scale)

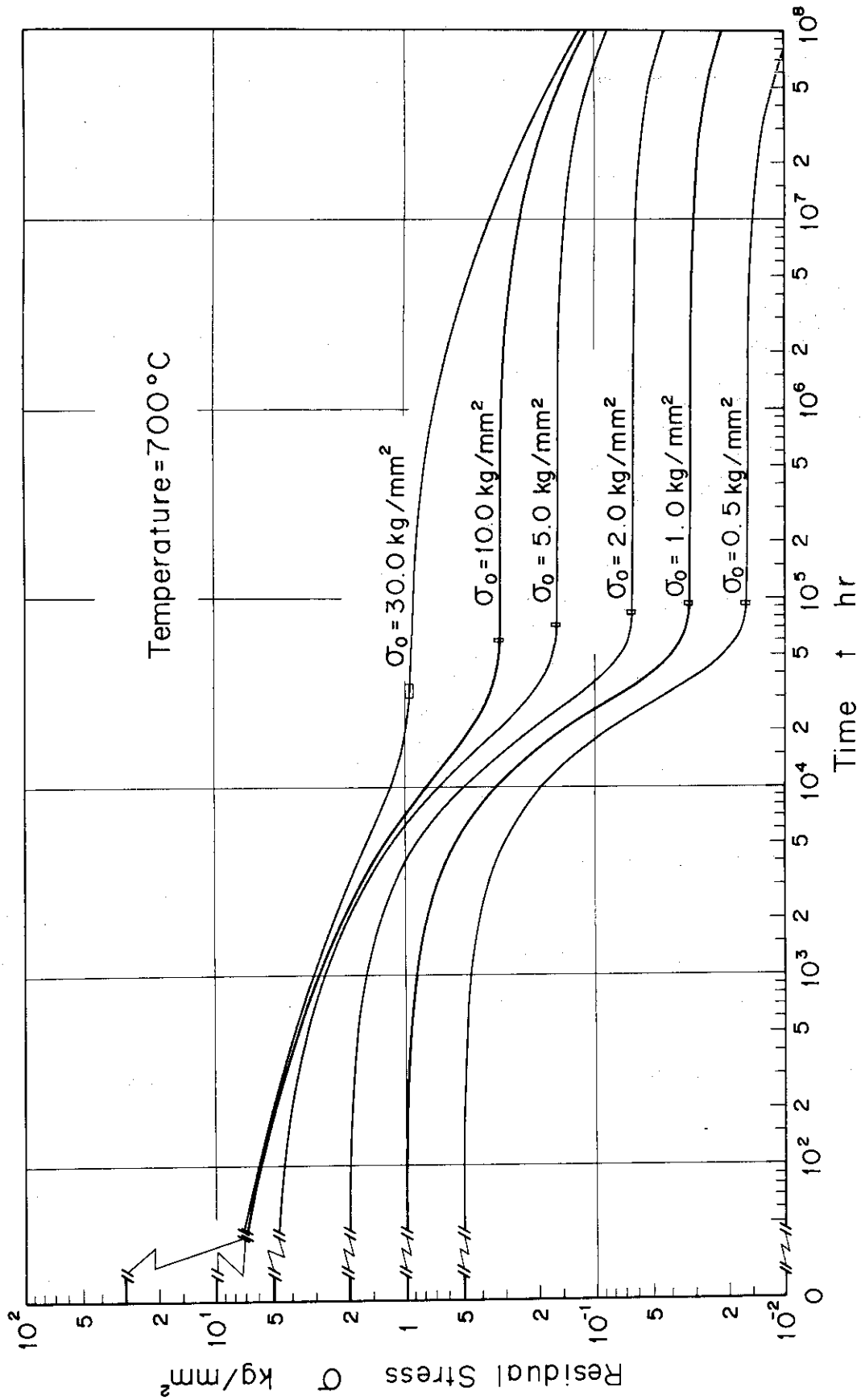


Fig. 2.2.7 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=700 °C (log-log scale)

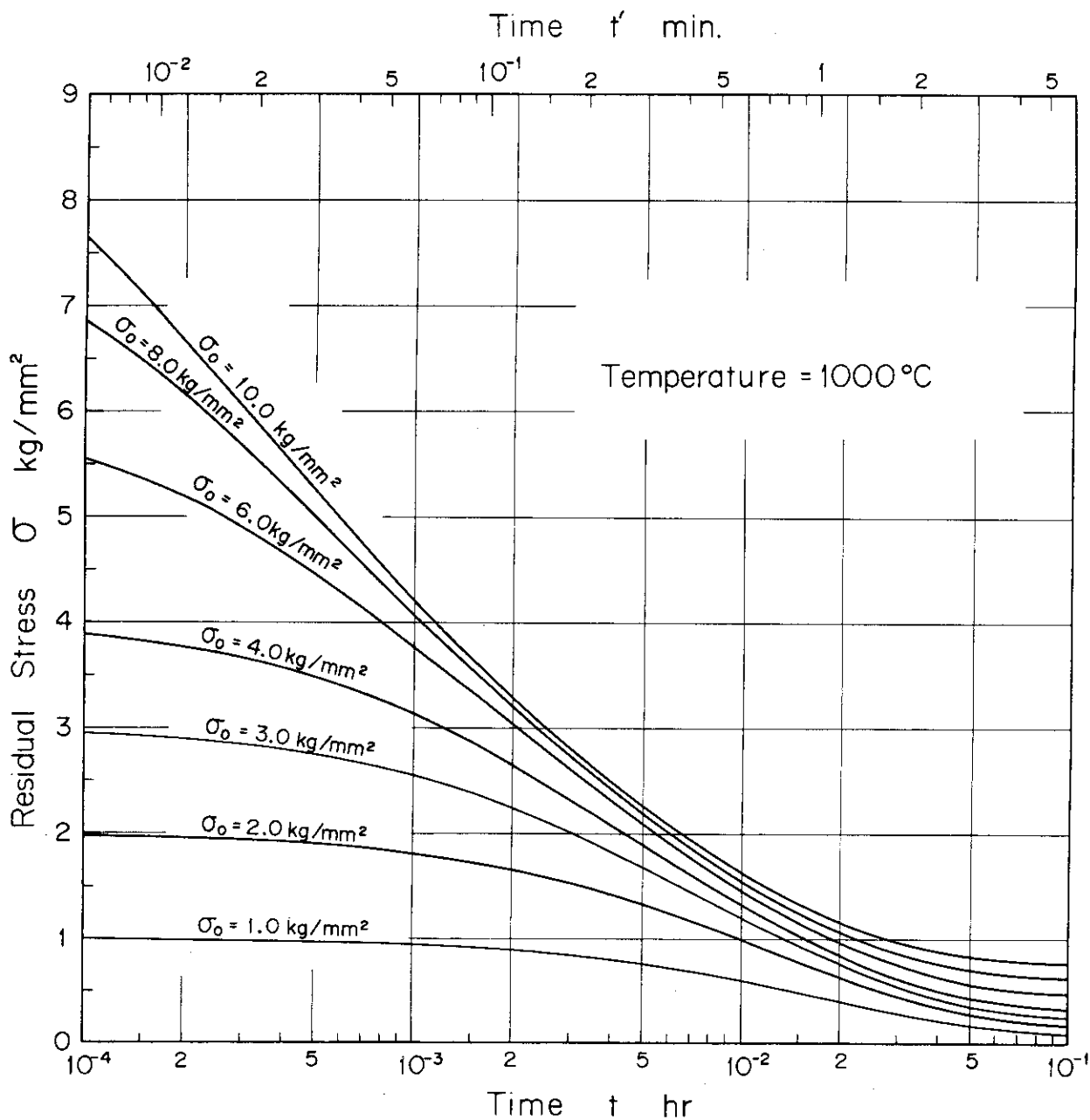


Fig. 2.2.8 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=1000 °C (semi-log scale)

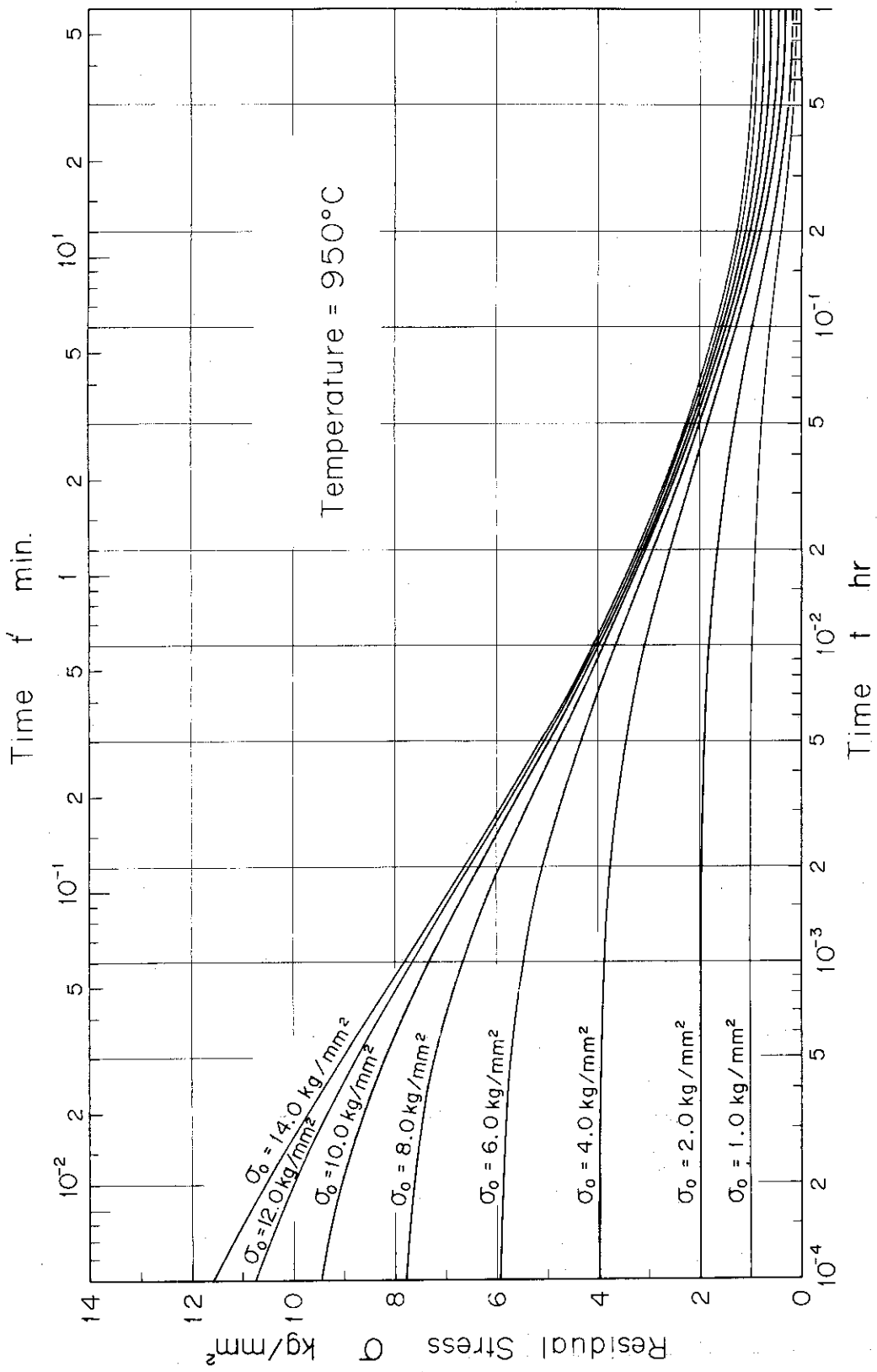


Fig. 2.2.9 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=950 °C (semi-log scale)

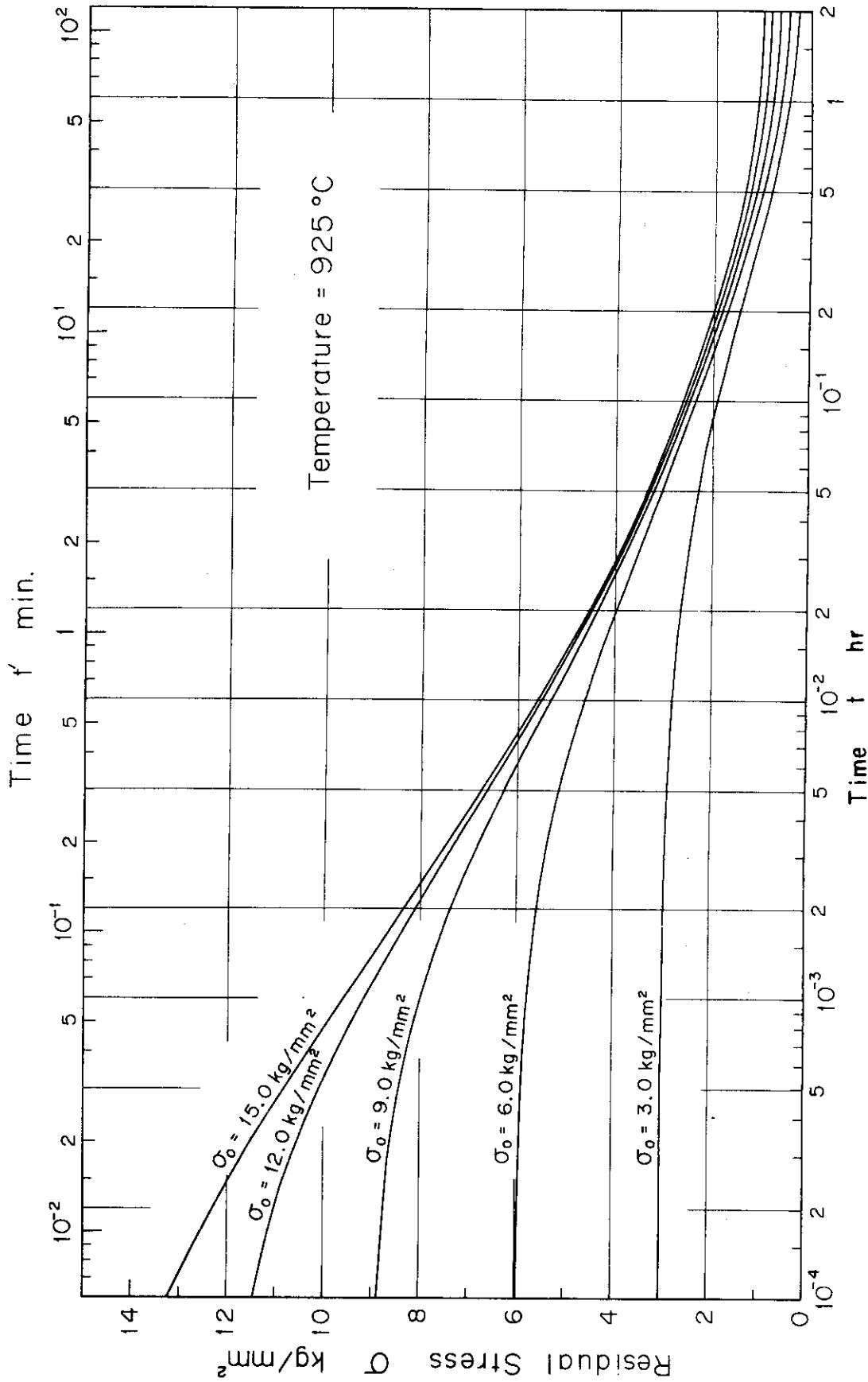


Fig. 2.2.10 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=925 °C (semi-log scale)



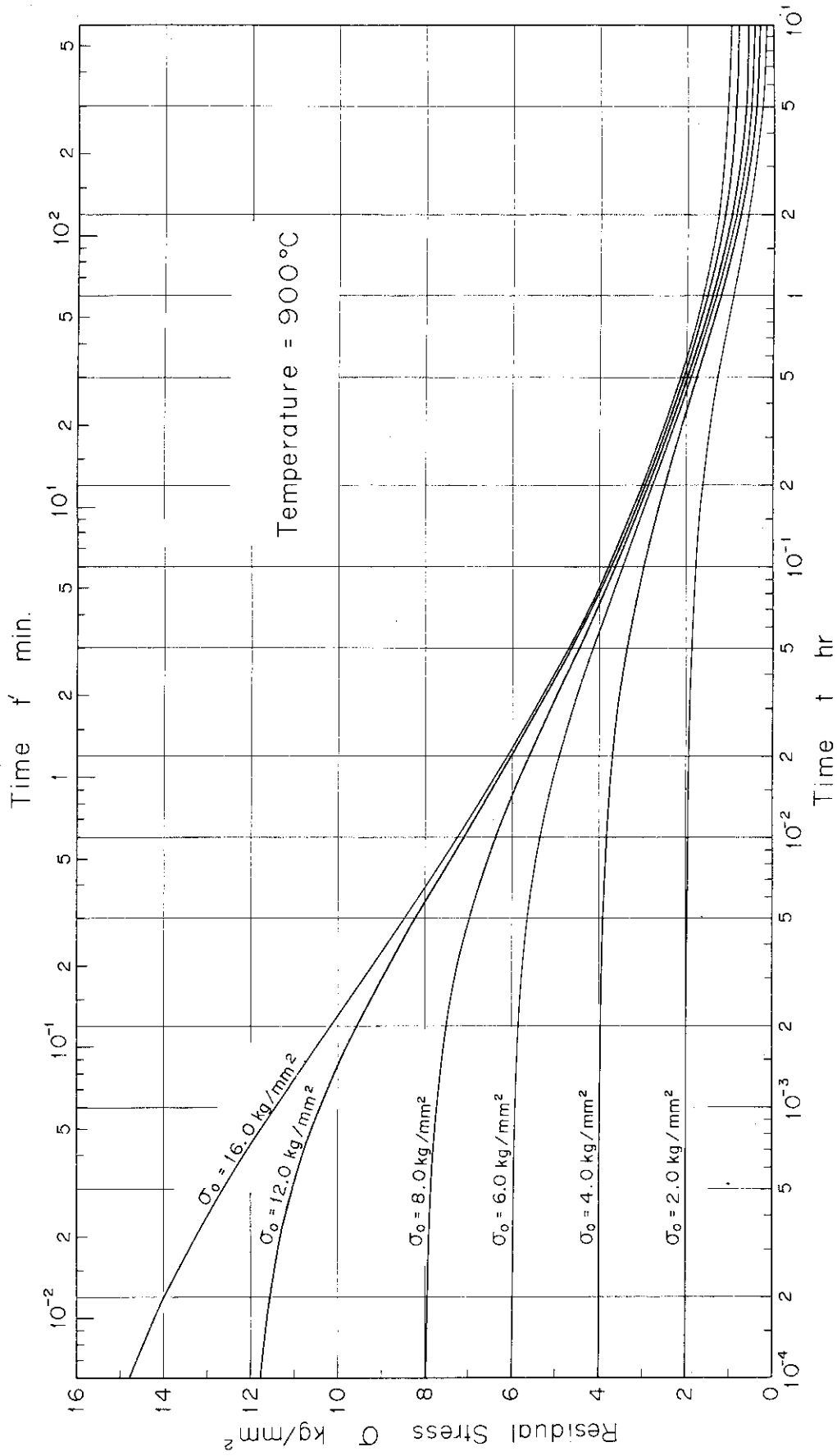


Fig. 2.2.11 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=900. °C (semi-log scale)

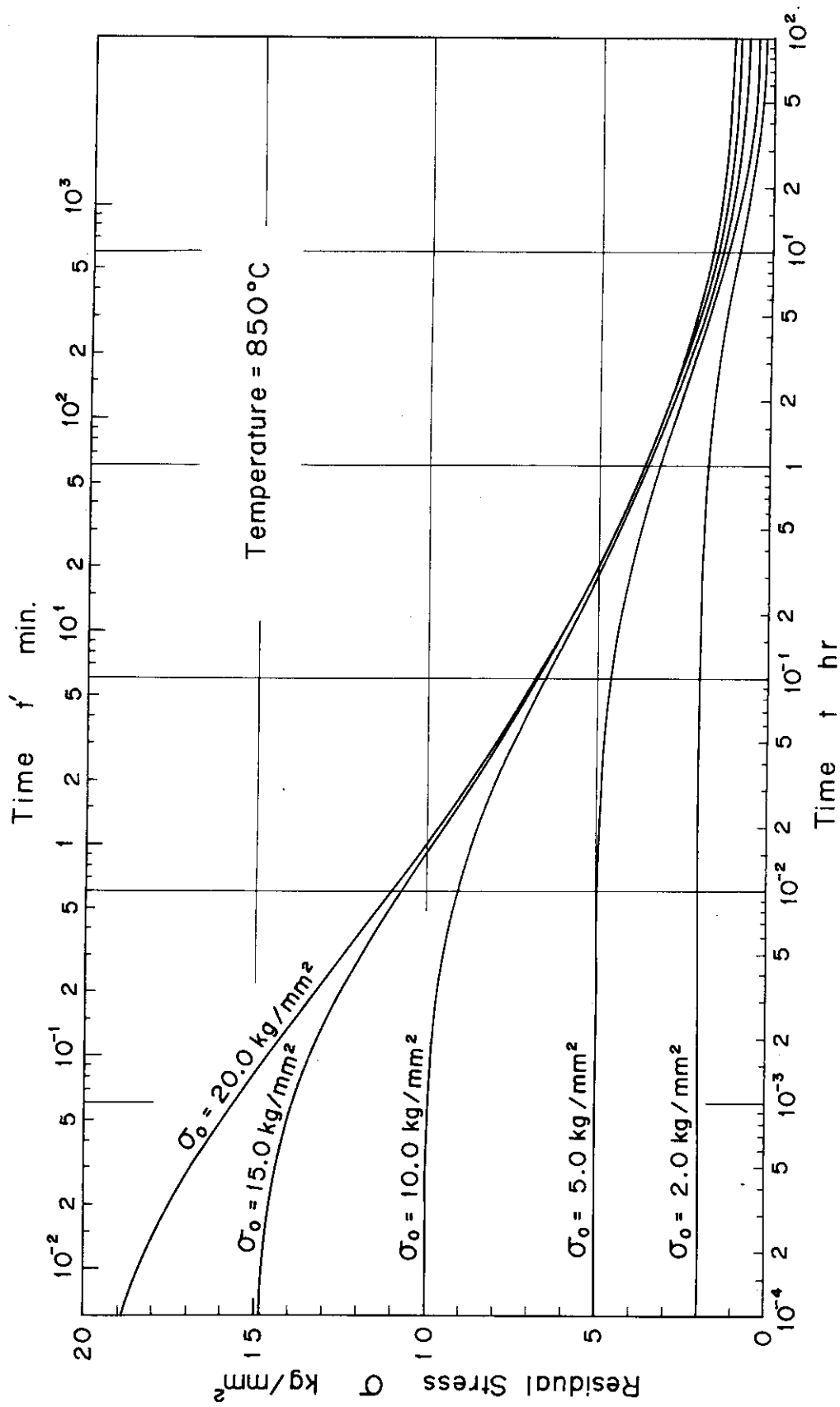


Fig. 2.2.12 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=850 °C (semi-log scale)

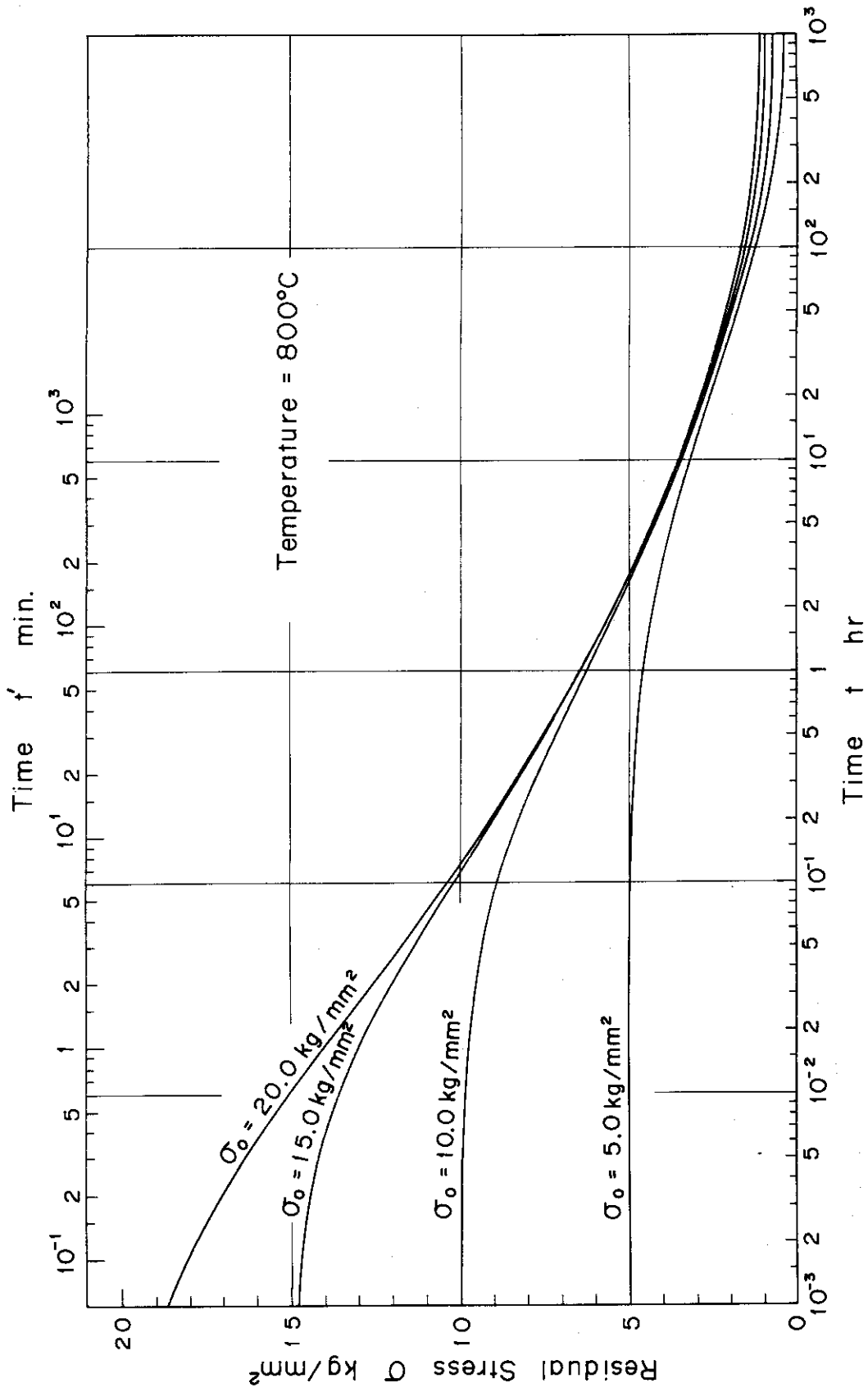


Fig. 2.2.13 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=800 °C (semi-log scale)

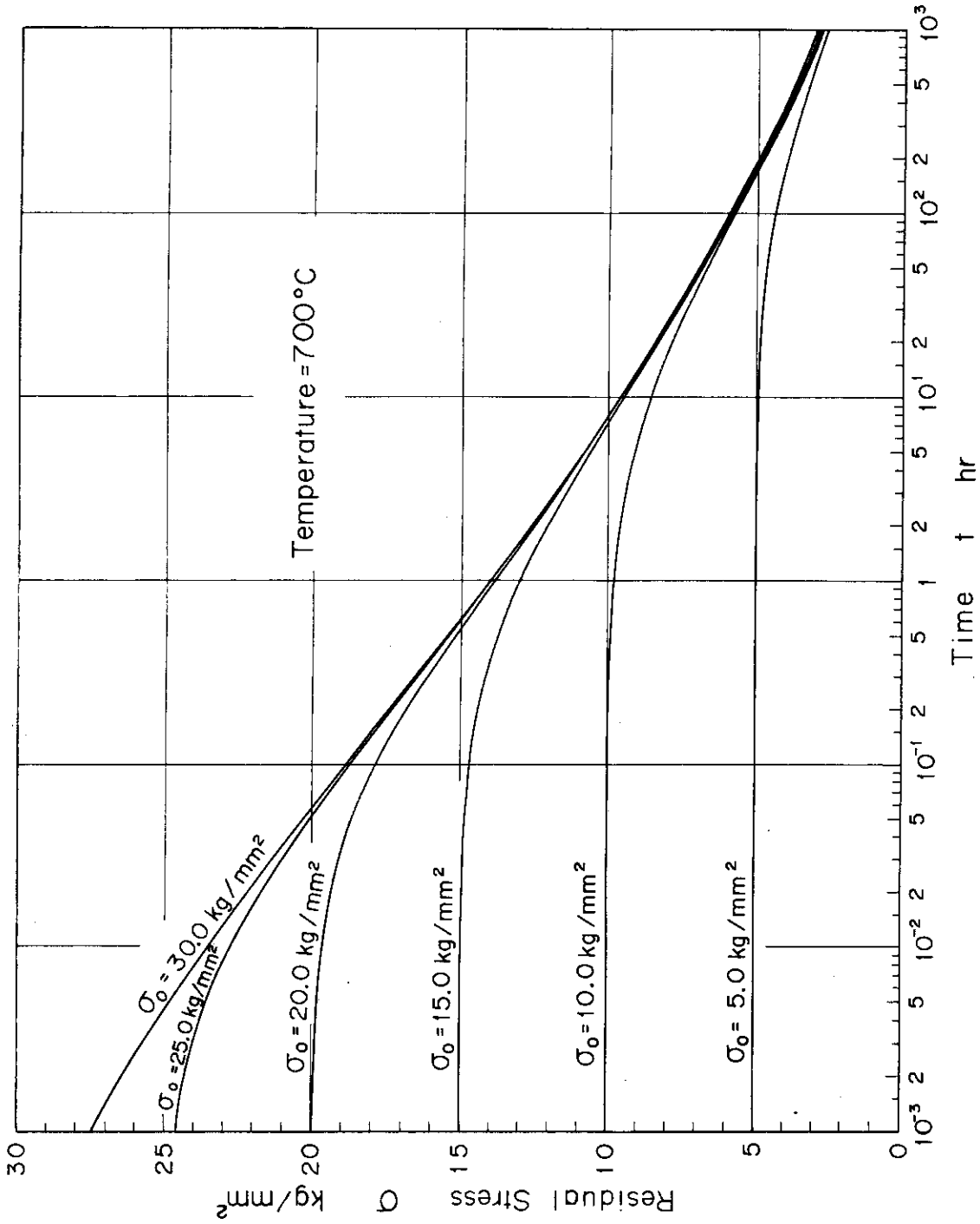


Fig. 2.2.14 Relaxation Curves of Hastelloy X at T=700 °C (semi-log scale)

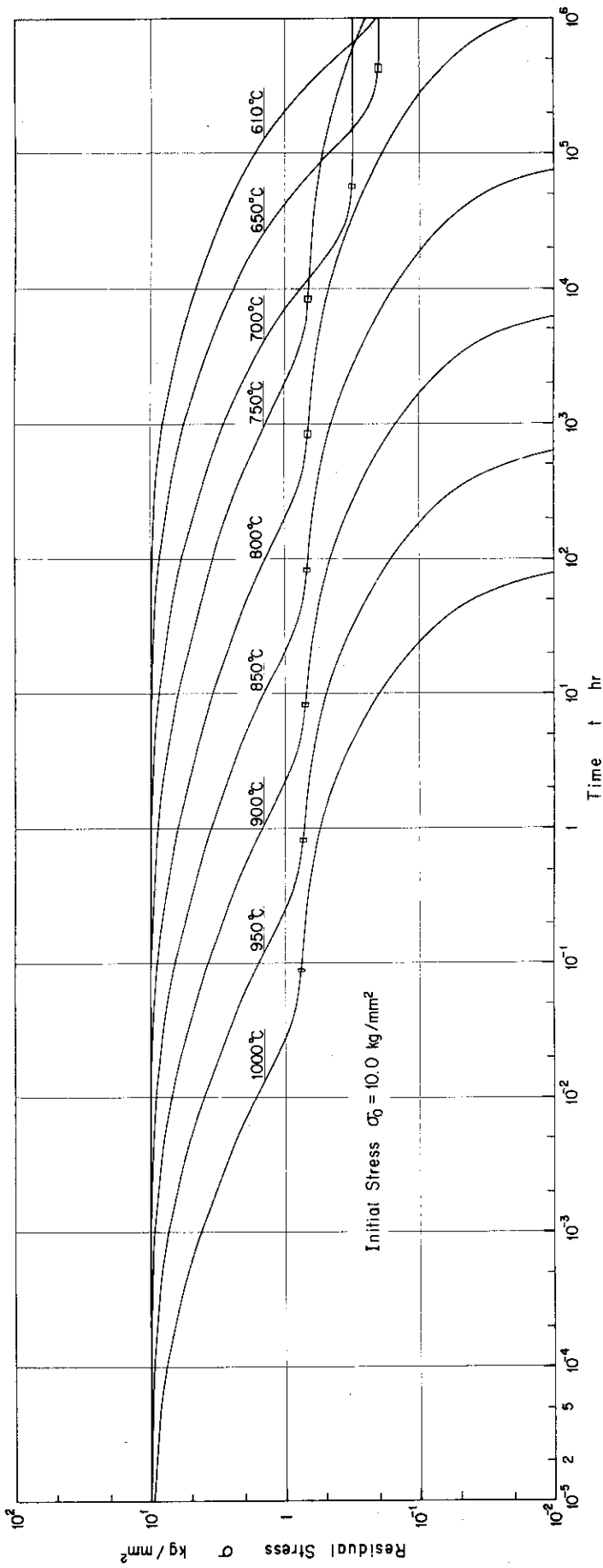


Fig. 2.2.15 Relaxation Curves of Hastelloy X at  $\sigma_0 = 10.0$  kg/mm<sup>2</sup>

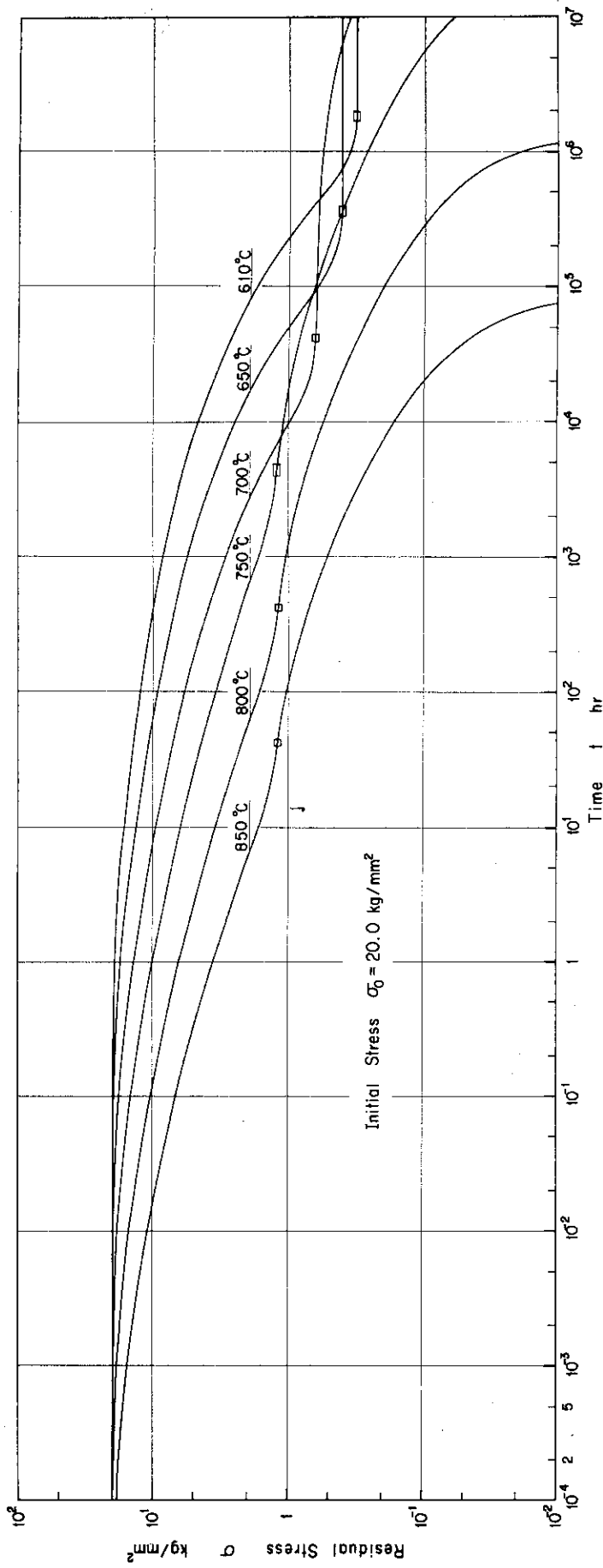


Fig. 2.2.16 Relaxation Curves of Hastelloy X at  $\sigma_0 = 20.0 \text{ kg/mm}^2$

## 2.3 その他のリラクセーション線図

以上で得られたリラクセーションデータを基にして、(イ)リラクセーション設計線図、(ロ)残留応力が初期応力 $\sigma_0$ の $k$ 倍へと減少する時間を示す線図（本報では $k\sigma_0$ -時間線図と称する。）、(ハ)ある温度における初期応力と残留応力との関係を時間をパラメータにして示した線図（本報では残留応力-初期応力線図と称する。）を作成した。

### 2.3.1 リラクセーション設計線図

ある初期応力に関して、残留応力と温度との関係を時間をパラメータにして示した線図、即ちリラクセーション設計線図をFig. 2.3.1～Fig.2.3.4に示す。各図の初期応力は以下のとおり。

Fig. 2.3.1 .....  $\sigma_0 = 5.0 \text{ kg/mm}^2$

Fig. 2.3.2 .....  $\sigma_0 = 10.0 \text{ kg/mm}^2$

Fig. 2.3.3 .....  $\sigma_0 = 15.0 \text{ kg/mm}^2$

Fig. 2.3.4 .....  $\sigma_0 = 20.0 \text{ kg/mm}^2$

また、ORNLの試験データ<sup>(2)</sup>との比較をFig. 2.3.5に示す。この比較において、筆者らの提示したクリープ構成方程式がORNLのリラクセーション試験に用いたハステロイX材のクリープ特性を的確には表現していないであろうことを考え併せれば、本クリープ構成方程式とTEPICC-Jコードとを用いたハステロイXのリラクセーション予測手法は、ハステロイXのリラクセーション特性を十分な精度をもって予測できるものであると言えよう。

なお、これらのリラクセーション設計線図において750℃を境にして曲線の傾きが異なっているのは、第2.2節で指摘したように、 $\epsilon_t$ の温度依存性が750℃を境にして異なっているからである。

### 2.3.2 $k\sigma_0$ -時間線図

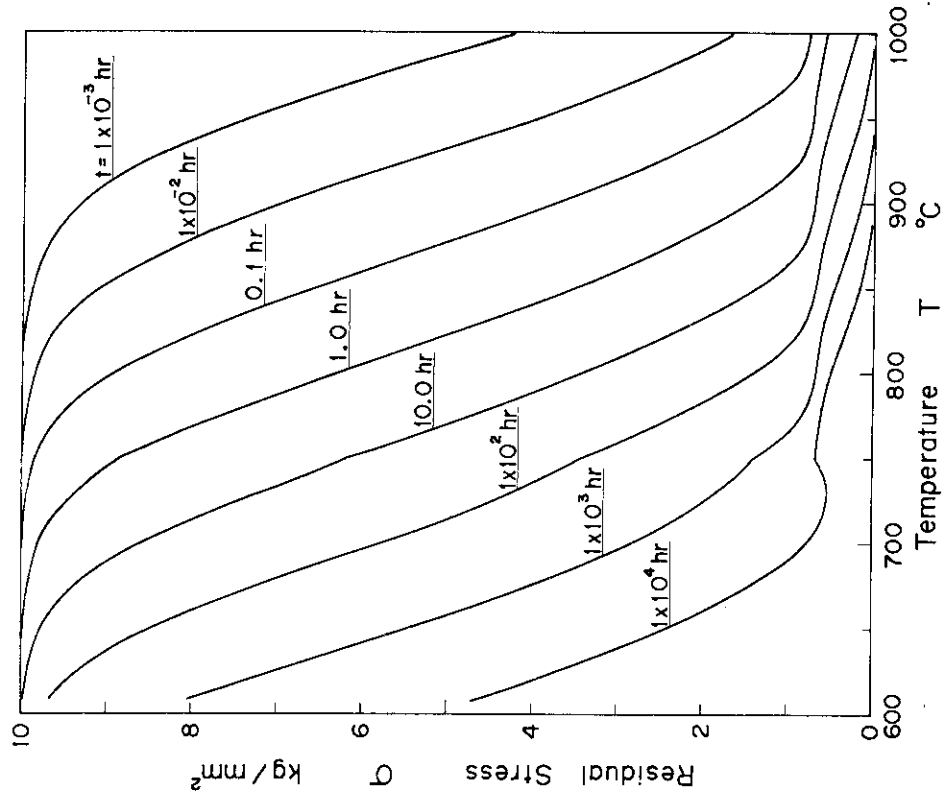
残留応力が初期応力 $\sigma_0$ の $k$ 倍、即ち $k\sigma_0$ に減少する時間を示した線図、即ち $k\sigma_0$ -時間線図を $k=0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1$ について描くとFig.2.3.6～Fig.2.3.11のようになる。

これらの線図をみると、 $\sigma_0=5.0 \text{ kg/mm}^2$ 付近を境にして曲線の傾きがやや異なっていることがわかる（特に、 $k=0.9, 0.8, 0.7$ の曲線）。これは、クリープ構成方程式において $\epsilon_t$ の応力依存性が $5.0 \text{ kg/mm}^2$ を境にして異なっているからである。

なお、残留応力が $0.1\sigma_0$ 以上（即ち、 $k \geq 0.1$ ）においては、そのときのクリープひずみ速度が二次クリープひずみ速度成分のみから構成されるという段階にはまだ至っていない。

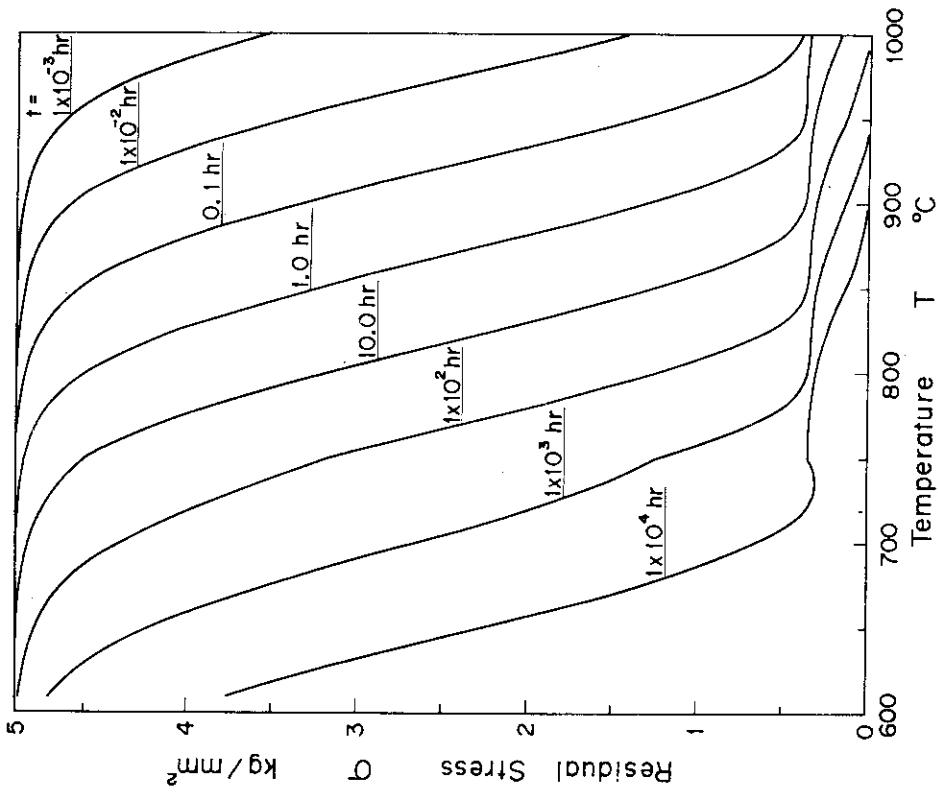
### 2.3.3 残留応力-初期応力線図

ある時間経過したときに残留応力がどのくらい減少したかを初期応力の関数として示した線図、即ち残留応力-初期応力線図をFig.2.3.12～Fig.2.3.18に示す。



Initial Stress  $\sigma_0 = 10.0 \text{ kg/mm}^2$

Fig. 2.3.2 Relaxation Design Diagram at  $\sigma_0 = 10.0 \text{ kg/mm}^2$



Initial Stress  $\sigma_0 = 5.0 \text{ kg/mm}^2$

Fig. 2.3.1 Relaxation Design Diagram at  $\sigma_0 = 5.0 \text{ kg/mm}^2$



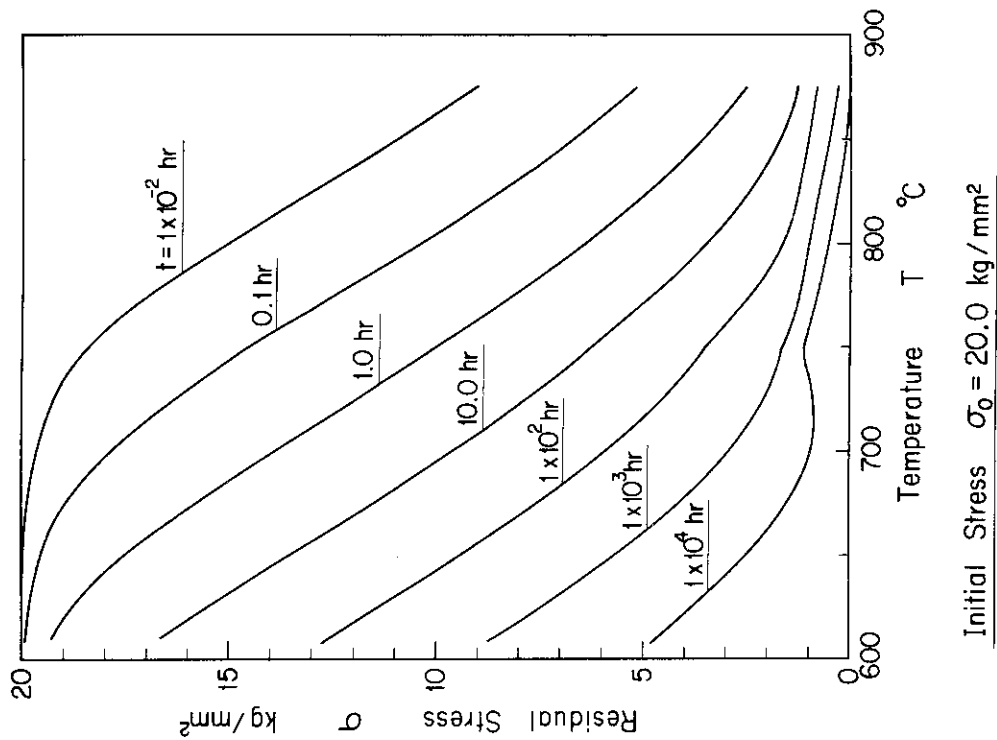


Fig. 2.3.4 Relaxation Design Diagram at  $\sigma_0 = 20.0$  kg/mm<sup>2</sup>

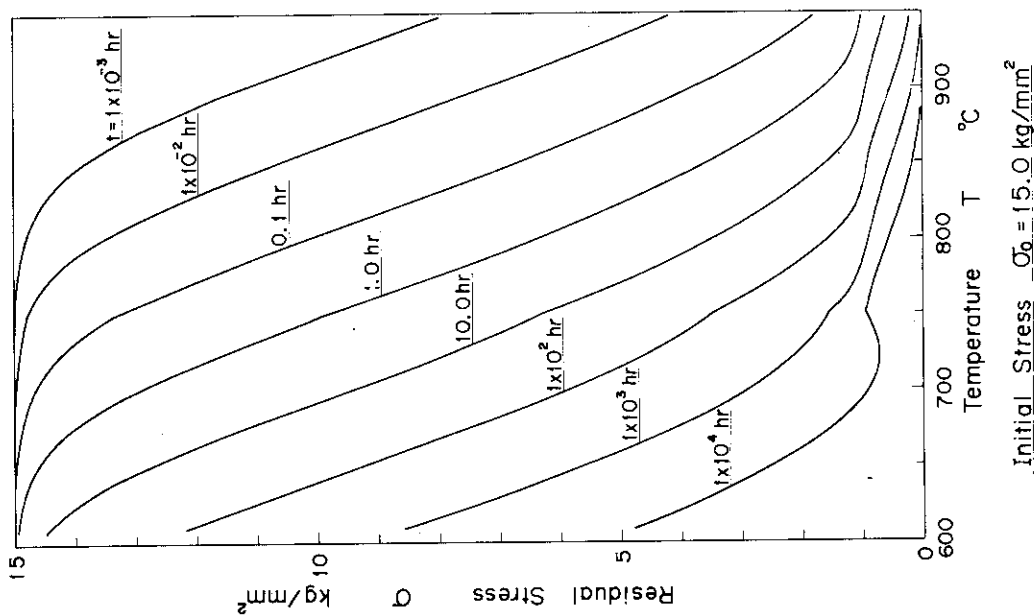
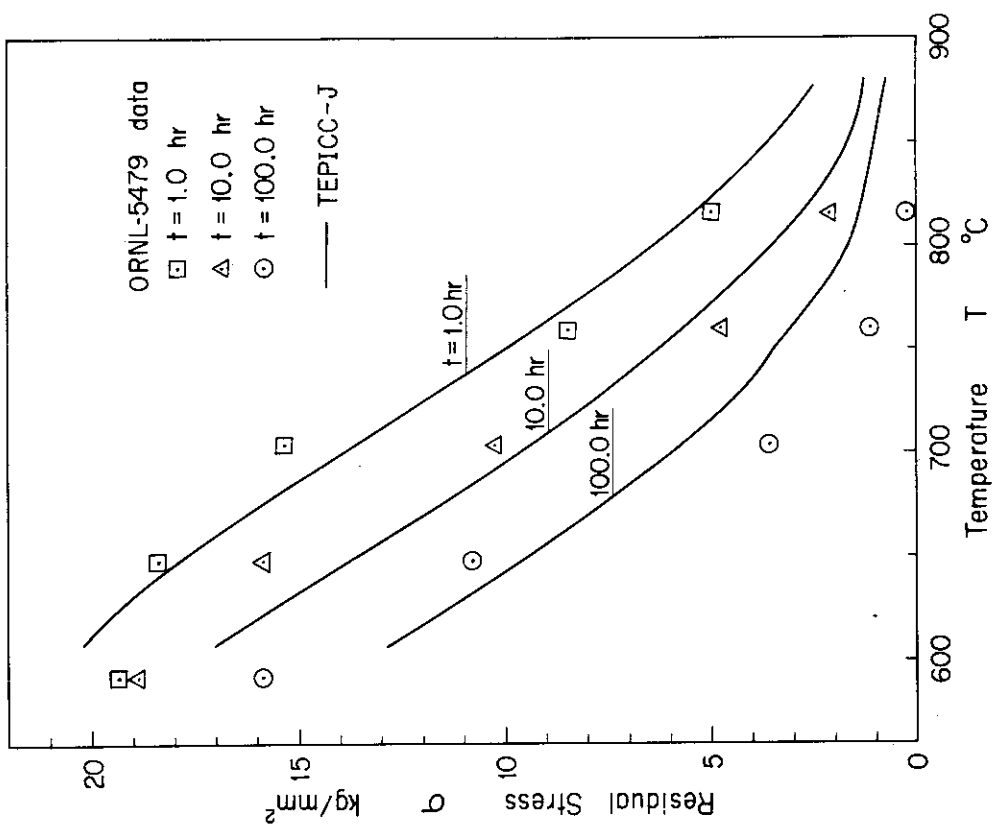


Fig. 2.3.3 Relaxation Design Diagram at  $\sigma_0 = 15.0$  kg/mm<sup>2</sup>



Initial Stress  $\sigma_0 = 21.41 \text{ kg/mm}^2 = 210 \text{ MPa}$

Fig. 2.3.5 Comparison with Experimental Data of ORNL-5479

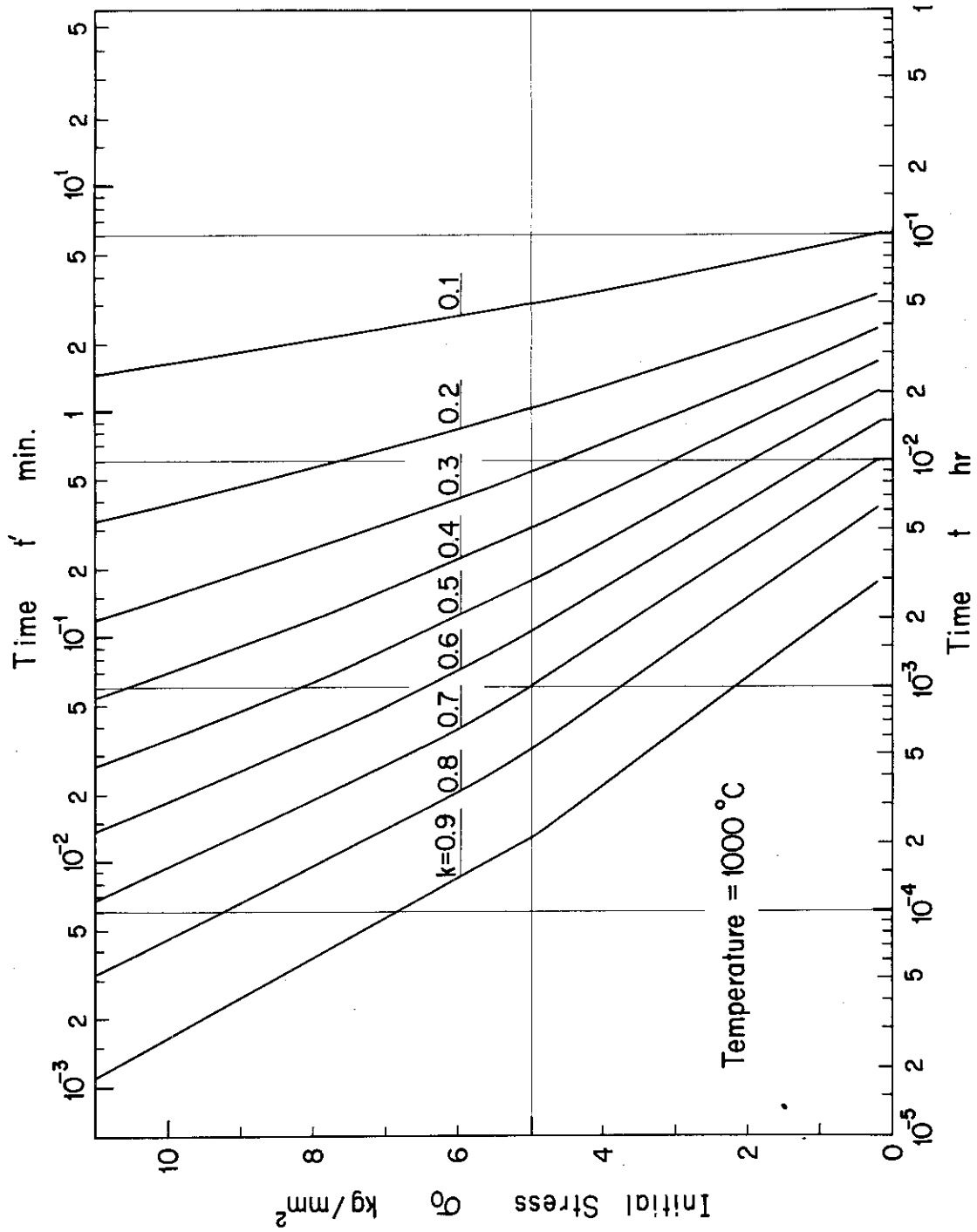


Fig. 2.3.6  $k_{\sigma_0}$ -Time Diagram of Hastelloy X at T=1000 °C

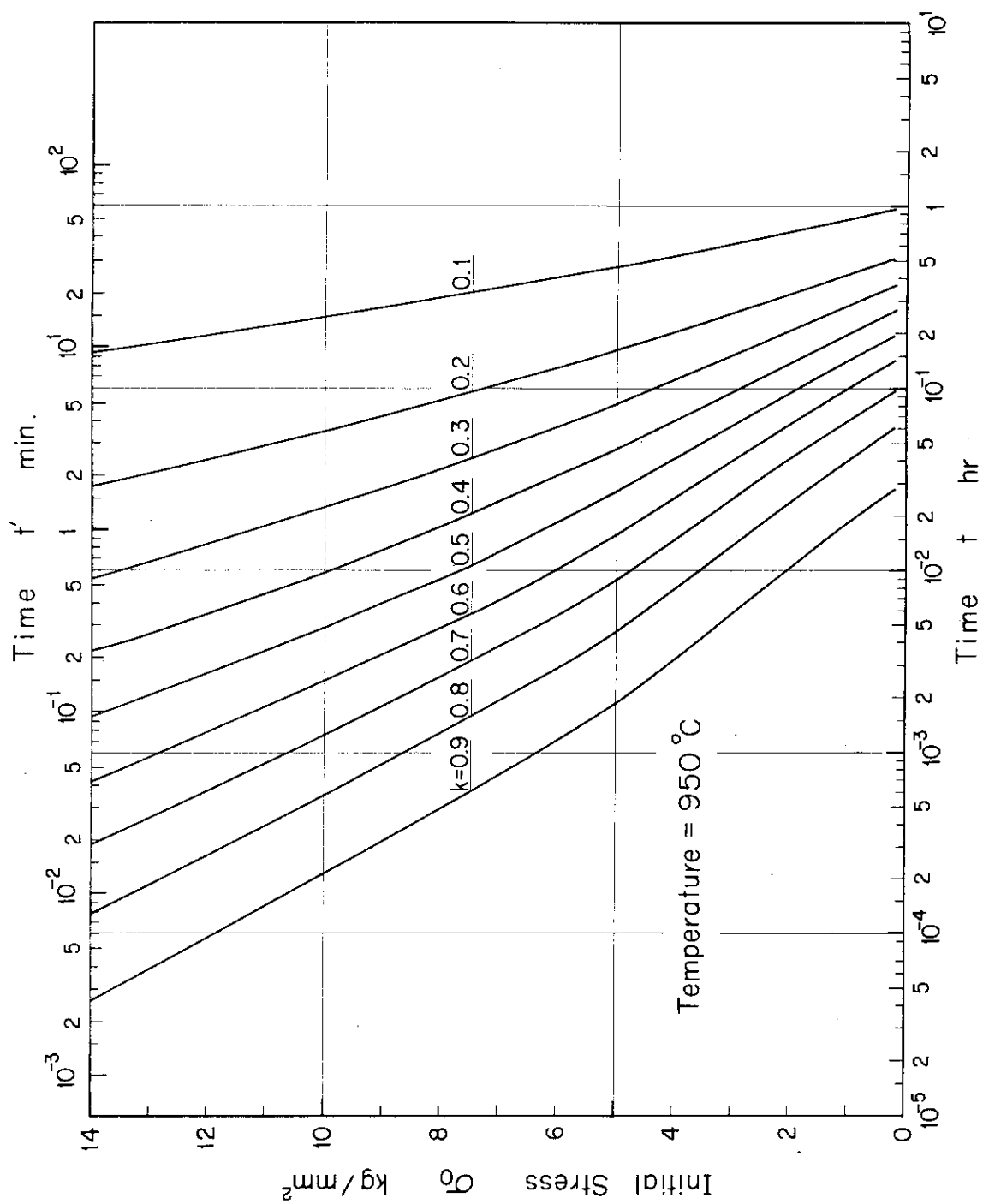


Fig. 2.3.7  $k\sigma_0$ -Time Diagram of Hastelloy X at  $T=950 \text{ }^\circ\text{C}$

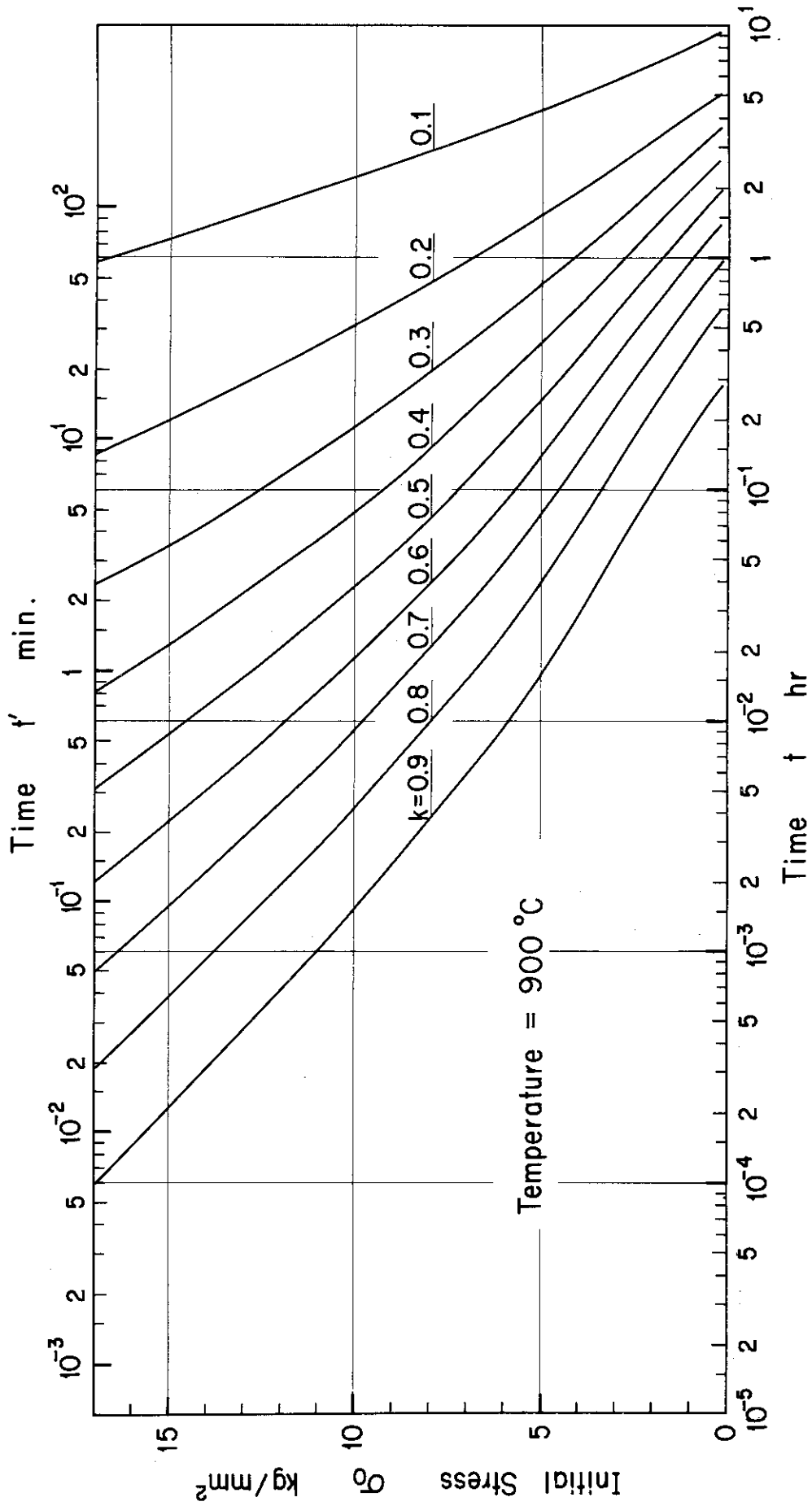


Fig. 2.3.8  $k\sigma_0$ -Time Diagram of Hastelloy X at  $T=900^\circ\text{C}$

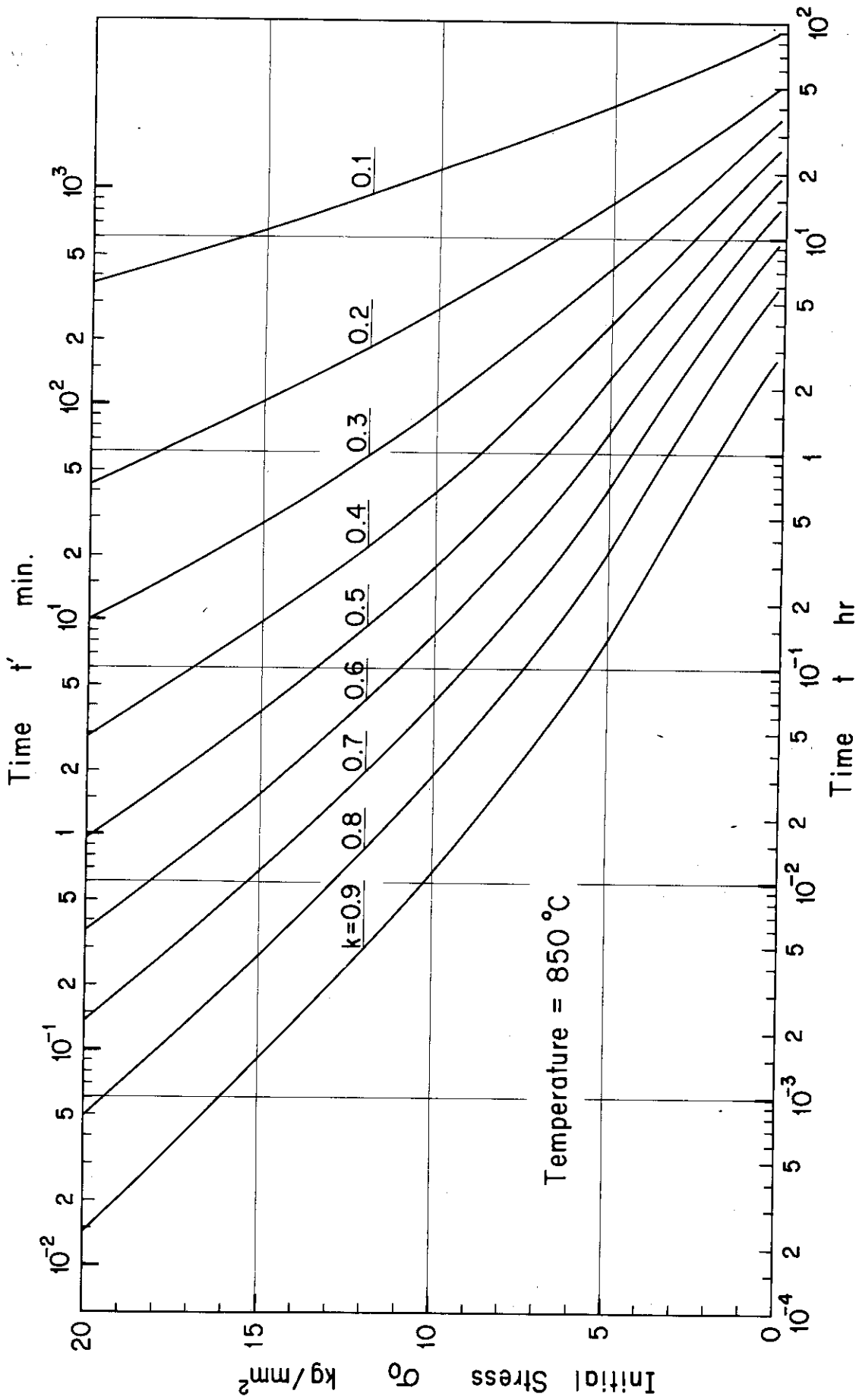


Fig. 2.3.9  $k\sigma_0$ -Time Diagram of Hastelloy X at T=850 °C

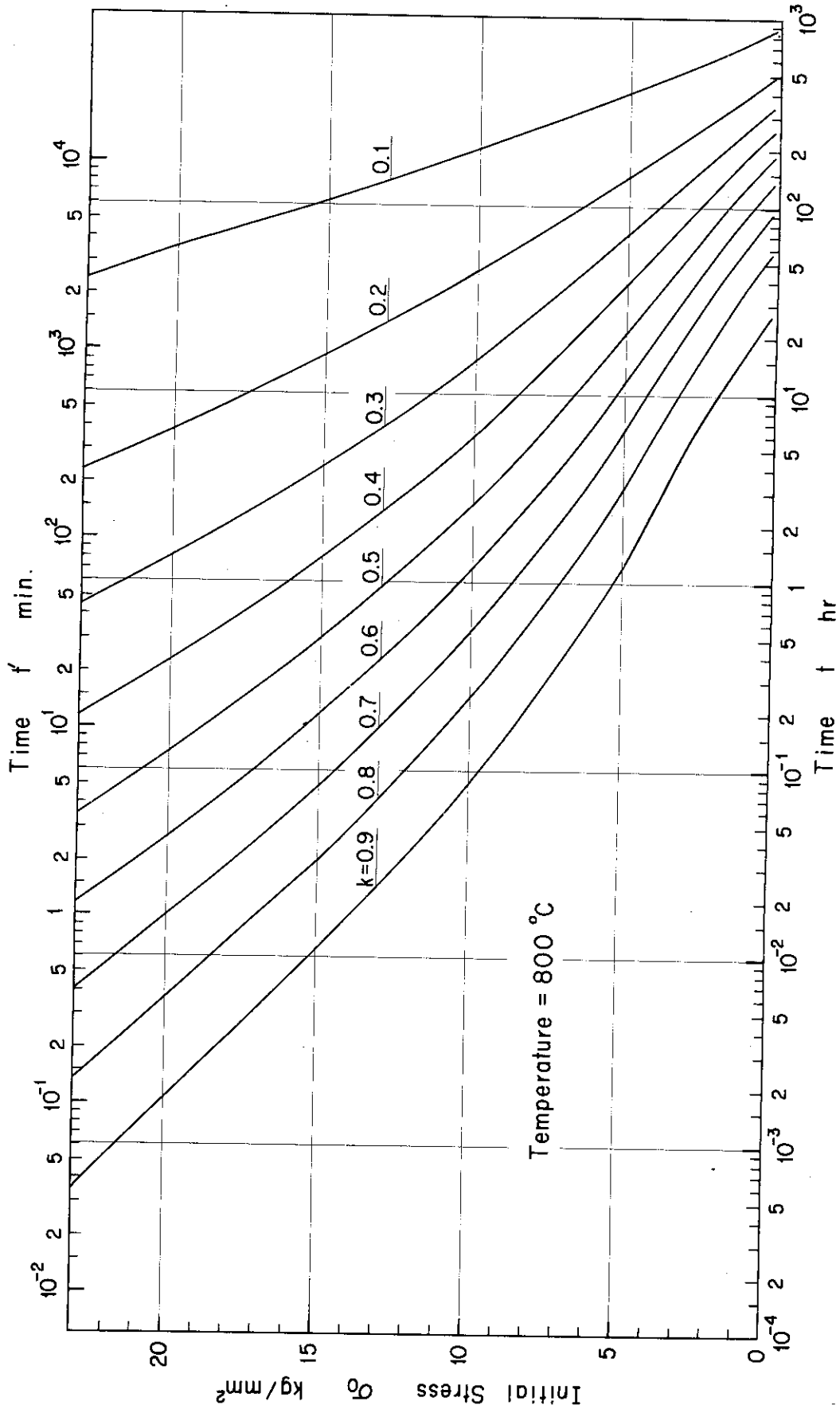


Fig. 2.3.10  $k\sigma_0$ -Time Diagram of Hastelloy X at T=800 °C

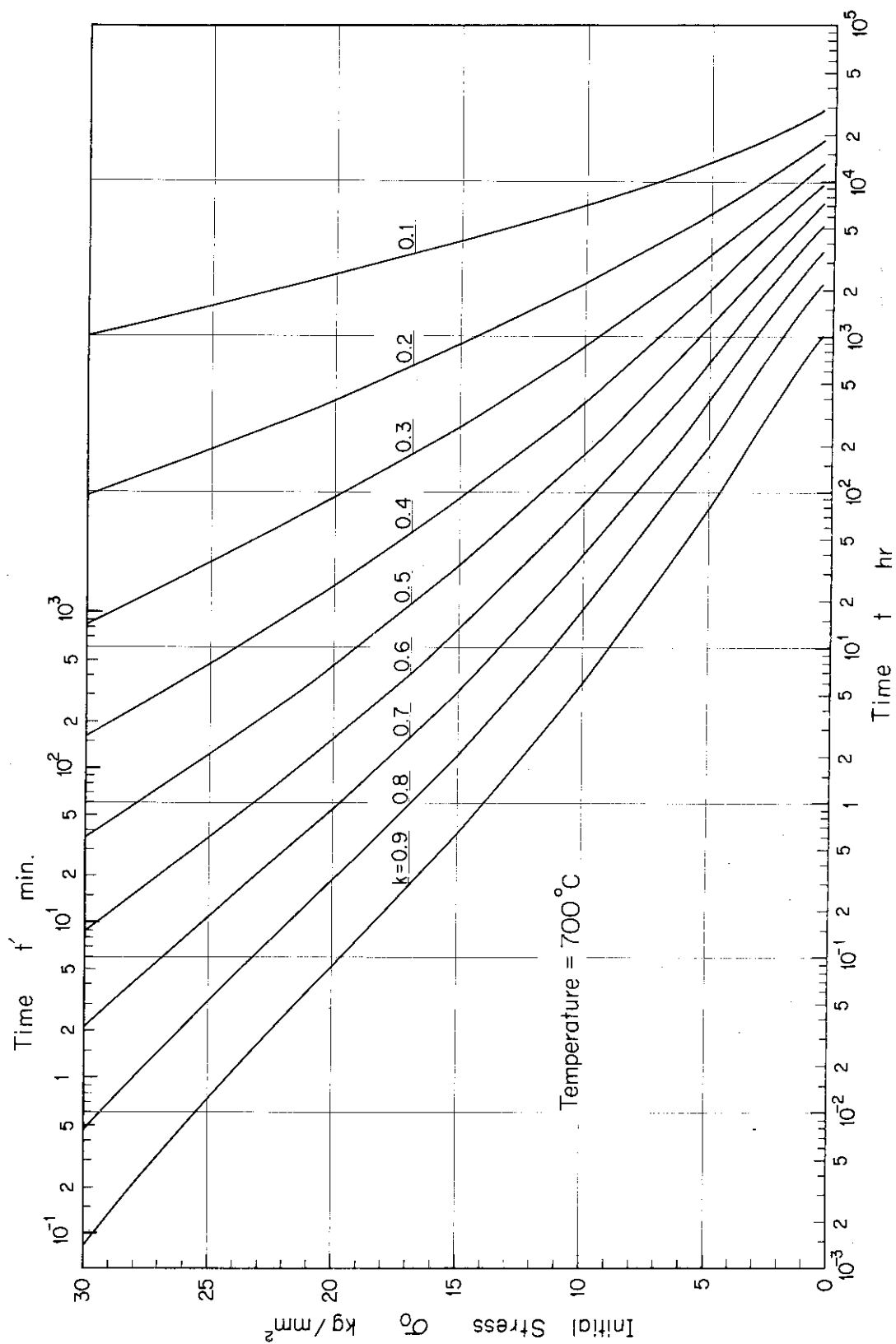


Fig. 2.3.11  $k\sigma_0$ -Time Diagram of Hastelloy X at T=700 °C



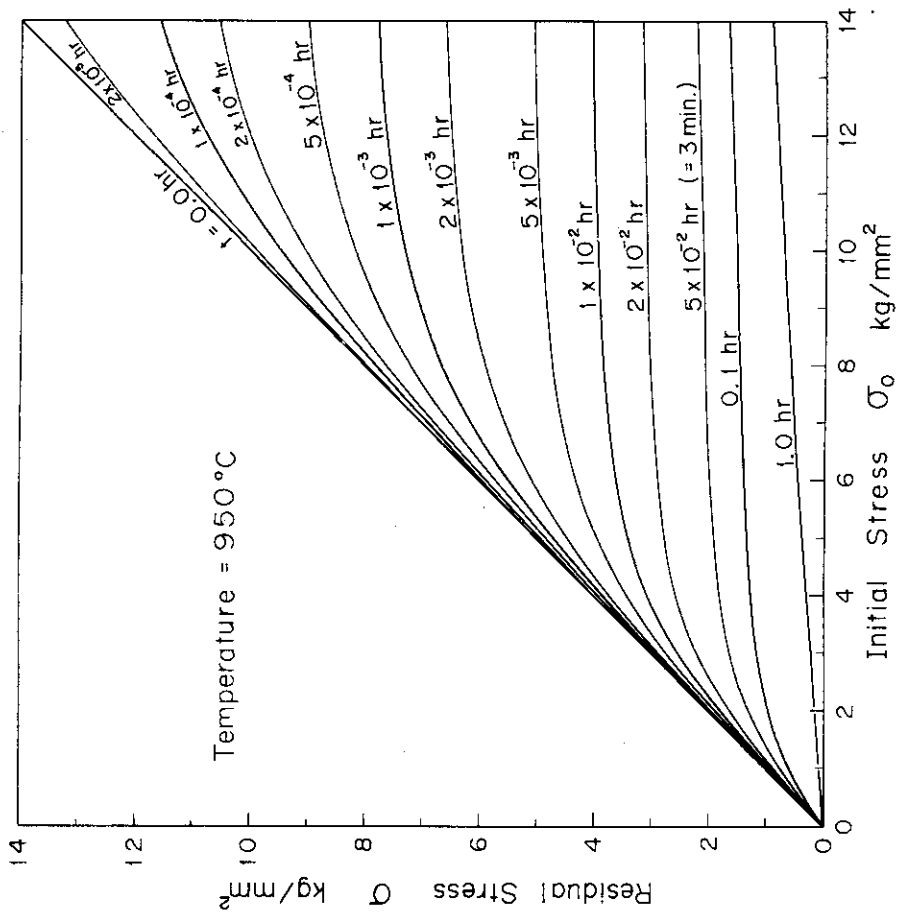


Fig. 2.3.13 Residual Stress-Initial Stress Diagram of Hastelloy X at T=950 °C

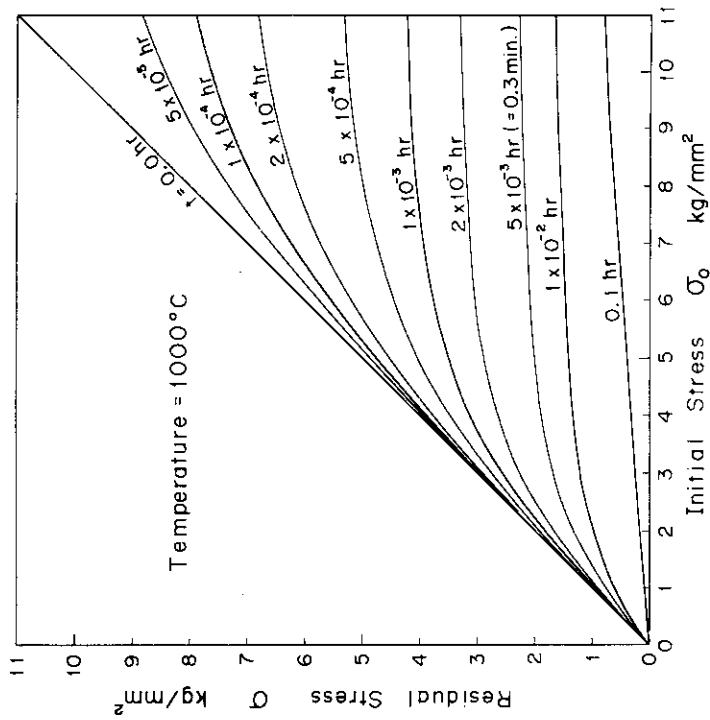


Fig. 2.3.12 Residual Stress-Initial Stress Diagram of Hastelloy X at T=1000 °C

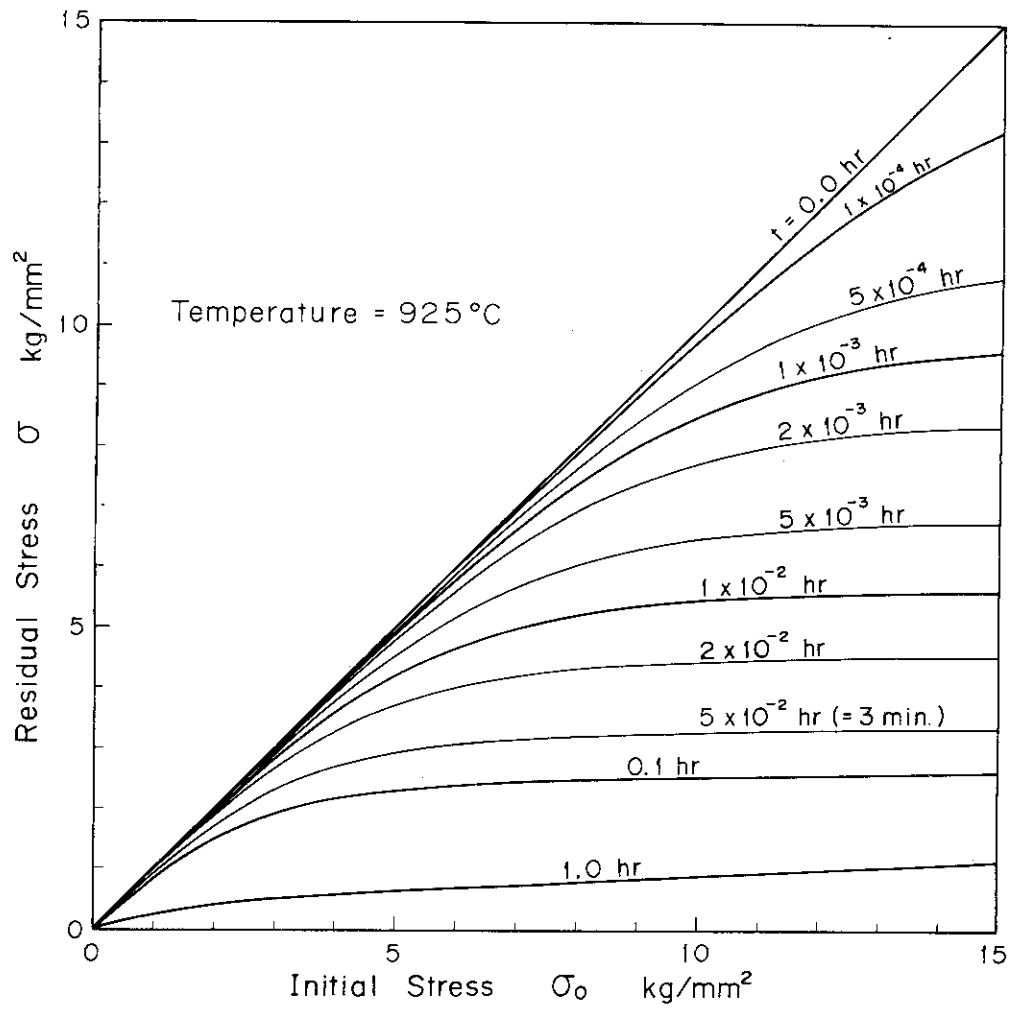


Fig. 2.3.14 Residual Stress-Initial Stress Diagram of Hastelloy X at T=925 °C

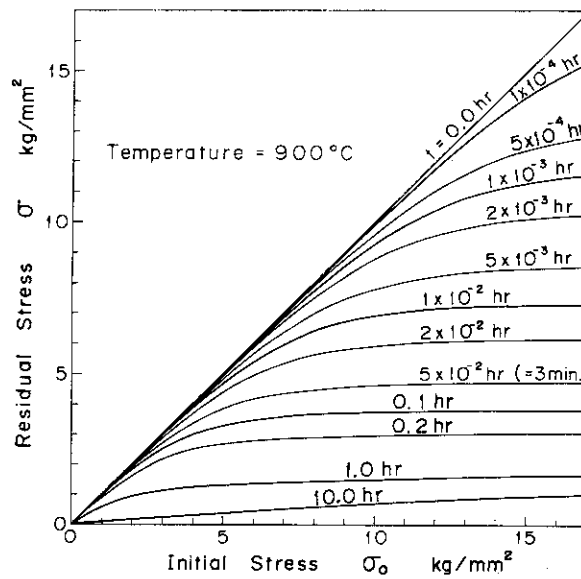


Fig. 2.3.15 Residual Stress-Initial Stress Diagram of Hastelloy X at T=900 °C

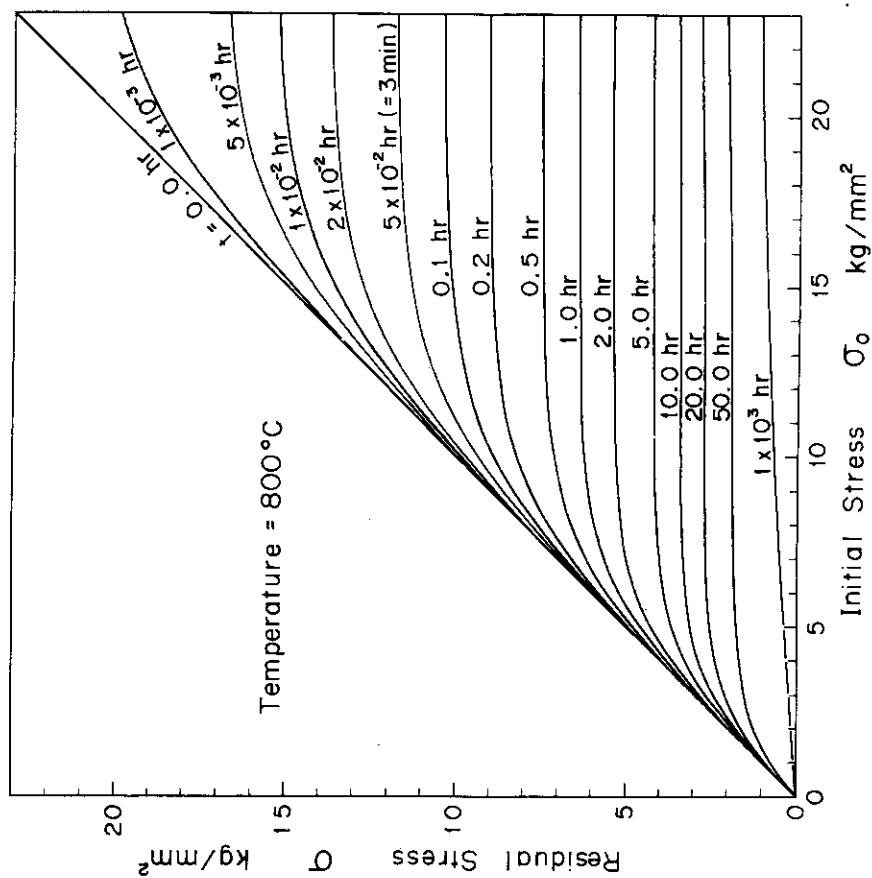


Fig. 2.3.17 Residual Stress-Initial Stress Diagram of Hastelloy X at T=800 °C

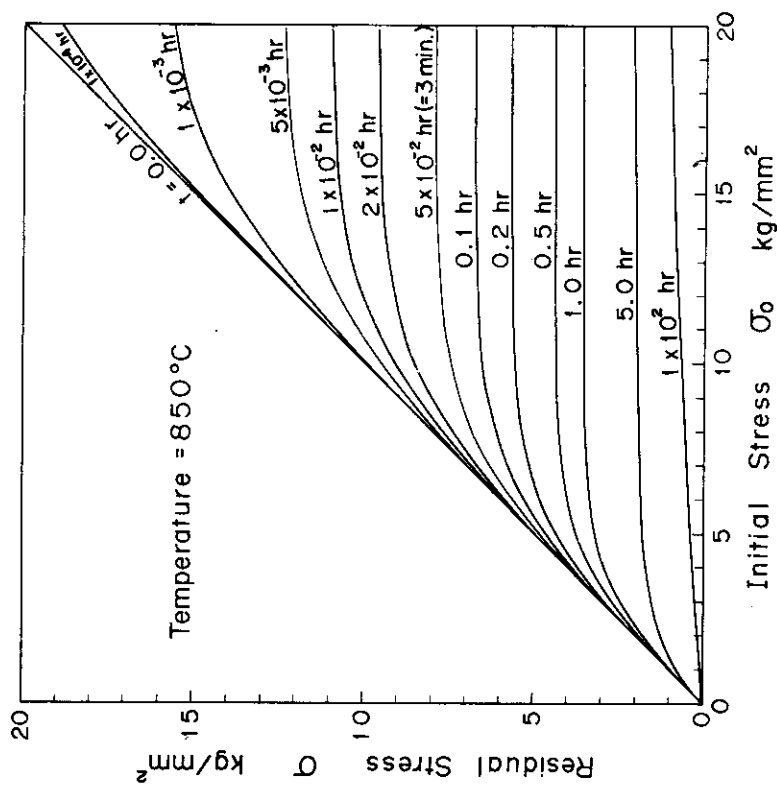


Fig. 2.3.16 Residual Stress-Initial Stress Diagram of Hastelloy X at T=850 °C

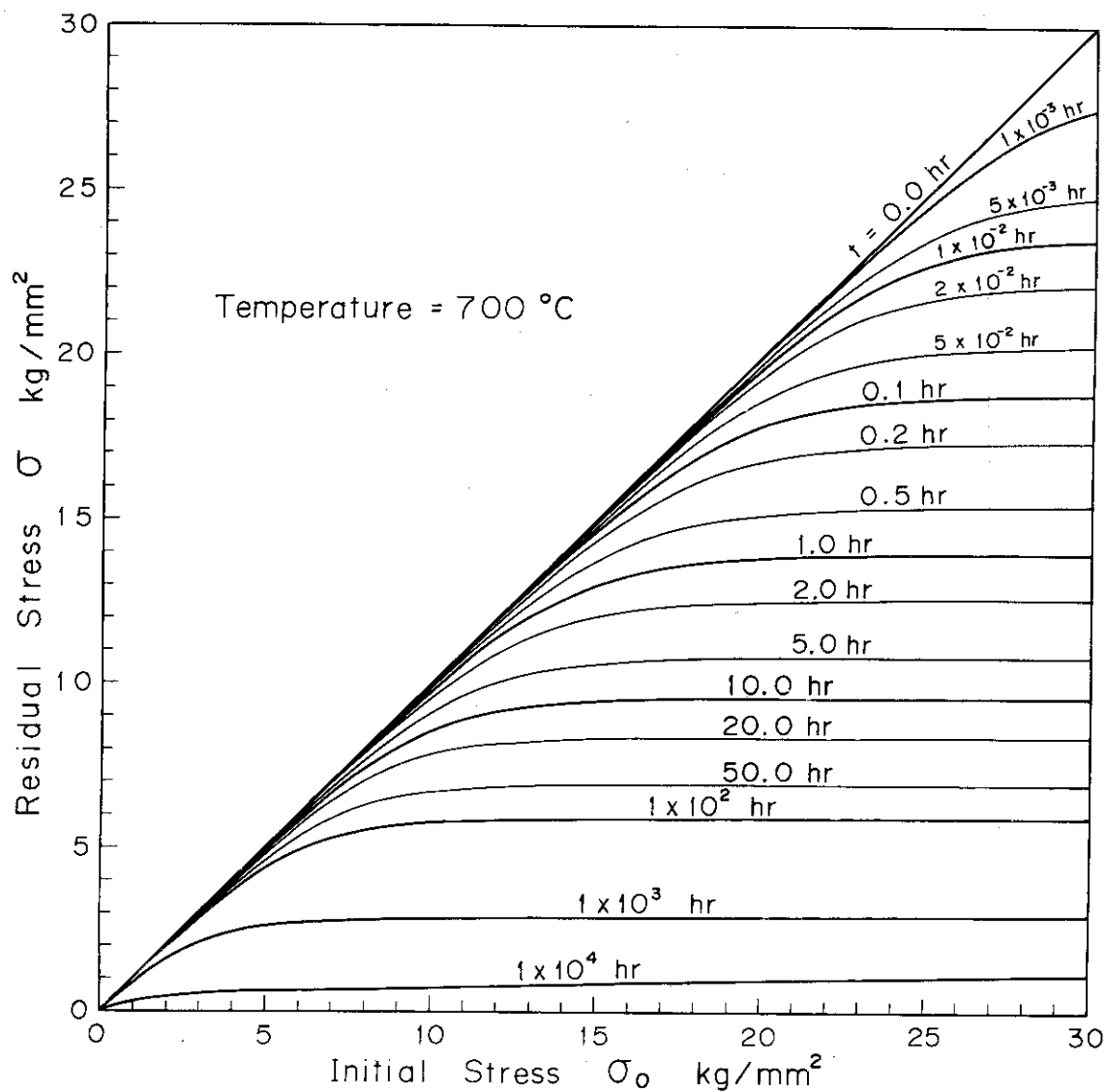


Fig. 2.3.18 Residual Stress-Initial Stress Diagram of Hastelloy X at T=700 °C

### 3. リラクゼーション挙動の解析と クリープひずみの推定

第2章で得られたリラクゼーションデータは構造物のリラクゼーション特性を記述するうえで非常に重要なデータであるが、これらのデータを得るために用いた解析モデルの構造や境界支持条件は一般の構造物の場合に比べて非常に単純である。構造物が複雑になってもそのリラクゼーション特性がほとんど変わらないのであれば、その構造物のリラクゼーション挙動をこれらのリラクゼーションデータから推測するのは簡単であるが、一般にはそうではなく、構造物の形状やその境界支持条件、更には負荷荷重の種類などが複雑になればなるほどそのリラクゼーション挙動は複雑になる。

そこで、実際の高温構造物におけるリラクゼーション特性を把握するために、高温配管や高温伝熱管などにおいて生ずる種々のリラクゼーション挙動のうち数例について、前述の非弾性応力解析コードTEPICC-Jを用いて解析した。また、これらのリラクゼーション挙動を、第2章で述べた方法によって得られるリラクゼーション曲線から推測することを試みた。以下にそれらの解析結果ならびにリラクゼーション曲線との比較結果を示す。

#### 3.1 熱応力のリラクゼーション

構造物に生ずる応力が不均一温度分布に起因する熱応力のみの場合のリラクゼーション挙動について二例解析する。

〔Case 1〕

##### 解析条件

Fig. 3.1.1に示すような内半径  $r_i = 200\text{mm}$ 、外半径  $r_o = 210\text{mm}$ の円管管壁内に、内壁面温度  $T_i = 900^\circ\text{C}$ 、外壁面温度  $T_o = 920^\circ\text{C}$ の直線温度分布が生じているとする（なお、この不均一温度分布は時間  $t = 0$ において瞬時に生ずるものとする）。そして、円管の管材はハステロイXとし、ハステロイXのクリープ特性等は前章で示されたものと同一とする。

TEPICC-Jに組み込むための解析モデルは、Fig. 3.1.2に示す幾何形状、要素構成とし、その支持条件はモデル下面の軸方向変位をゼロに拘束し上面の軸方向変位に一般化平面ひずみ条件を適用するものとする。

##### 解析結果

軸方向応力成分  $\sigma_z$  の管壁内半径方向分布は時間の経過とともにFig. 3.1.3に示すように変わっていく。この応力変化を要素ごとに追うとFig. 3.1.4に示すような応力変化となる。円周方向応力  $\sigma_\theta$  の変化も同様である。一方、軸方向クリープひずみ成分  $\epsilon_{c,z}$  の半径方向分布はFig. 3.1.5に示すように変化する。

これらの図から以下のことがわかる。

- (i) 当然のことながら、クリープひずみが累積していくに従って応力が減少していく。
- (ii)  $t = 0$ における応力分布は管壁中心でゼロの直線分布とみなすことができ、従って管壁中心

に関する点対称性があるが、 $t > 0$ においては、明らかに非線形な応力分布となり、かつ $\sigma_z = 0$ の位置も壁中心からずれている。これは累積クリープひずみ量の分布が非線形になっており、かつ壁中心に関して非対称になっているからであるが、これらの特徴は、用いたクリープ構成方程式の応力依存性が非線形であり、かつ方程式に温度依存性があることに起因している。即ち、クリープひずみ分布が非線形になるのはクリープひずみの応力依存性が非線形であるからであり、非対称なクリープひずみ分布になるのは、高温壁側（即ち、外壁側）の方が温度が高いためにその温度分だけクリープひずみ速度が大きくなり、その結果、高温壁側の累積クリープひずみ量がより多くなるからである。そして、クリープひずみと応力によるひずみとの和が熱ひずみと平衡することから、クリープひずみの偏りに対応して、応力減少も高温壁側の方が早くなり、その結果、力の平衡条件  $\int_{r_i}^{r_o} \sigma_z dr = 0$  を満足するために  $\sigma_z = 0$  の位置が低温壁側（即ち、内壁側）にスライドする。

しかしながら、応力がより早く減少すれば、その分クリープひずみ速度が小さくなるので、この分が温度が高い分を打ち消すという状態をいつかは迎えることになる。そして、このような状態になれば、応力分布は再び対称分布に近づく。

(iii) 長時間経過後の管壁中心における累積クリープひずみ量は零ではない。ところが、単純に、完全なリラクセーション後には  $\epsilon_c + \alpha \Delta T = 0$  ( $\epsilon_c$ : クリープひずみ,  $\alpha \Delta T = \alpha(T - T_m)$ : 熱ひずみ ( $T_m$ は壁中心温度)) の関係が成立すると、管壁中心においては  $\epsilon_c = 0$  でなければならない。このことは、裏返せば、最終的な累積クリープひずみ量は単純に熱ひずみに平衡する量だけ生ずるのではない、即ち  $\epsilon_c \approx -\alpha \Delta T$  となることを物語っている。

#### リラクセーション曲線との比較

ここでは、単純に、各要素の応力の時間変化を、その要素の  $t = +0$  (即ち、不均一温度分布負荷直後) における温度、応力をその温度、初期応力とするリラクセーション曲線によって推測してみる。要素番号 1.7.20.26 の要素について両者を比較すると Fig. 3.1.6 のようになる。Fig. 3.1.6 から以下のことがわかる。

- (i) 要素の初期条件に対応するリラクセーション曲線によってその要素応力のリラクセーション特性を良好に表現することができる。
- (ii) 低温壁側要素（要素番号 1～13）、高温壁側要素（要素番号 14～26）いずれも要素応力のリラクセーションはリラクセーション曲線よりも緩やかである。この理由としては、力の平衡条件  $\int_{r_i}^{r_o} \sigma_z dr = 0$  を満たすために応力分布が下方へスライドしているからということが考えられる。しかし、この理由によるとすると、低温壁側においては要素応力はリラクセーション曲線よりも早くリラクセーションしなければならず、矛盾する。低温壁側においても緩やかなのは、クリープひずみ  $\epsilon_{c,z}$  の分布をみればわかるように、応力分布が下方へスライドしていること（即ち、壁中心での  $\sigma_z < 0$ ）に対応してクリープひずみ分布が下方へスライドしている（即ち、壁中心での  $\epsilon_{c,z} < 0$ ）からであると考えられる。というのは、クリープひずみ分布が下方にスライドした分布になっていると、このクリープひずみ分布と熱ひずみ分布とを平衡させるための応力分布は、スライドさせない場合の応力分布を上方にスライドさせた応力分布（即ち、壁中心での  $\sigma_z > 0$ ）になるからである。そして、この相反する二つの効果の現れる程度の強弱によって Fig. 3.1.6 のような傾向が現われたものと思われる。

## 〔Case 2〕

解析条件

温度分布条件以外はCase 1の解析条件と同一である、管壁内温度分布は、内壁面温度 $T_i = 900^\circ\text{C}$ 、外壁面温度 $T_o = 940^\circ\text{C}$ の直線温度分布とする。

解析結果ならびにリラクゼーション曲線との比較

軸方向応力成分 $\sigma_z$ の管壁内半径方向分布は時間の経過とともにFig. 3. 1. 7に示すように変わっていく。要素番号1, 7, 14, 20, 26の要素についてこの応力変化を追うとFig. 3. 1. 8のようになる。また、Case 1で述べた方法によって要素番号1と26の要素に対するリラクゼーション曲線を求めるとFig. 3. 1. 8の破線のようになる。

これらの図には、Case 1の図でみられた傾向と同様の傾向が見られる。ただ、 $t = 0.1 \text{ hr}$ における $\sigma_z$ 分布に、高温側壁面での応力が $r = 208 \text{ mm}$ 付近での応力よりもその絶対値が小さいという特異現象がみられる。これは、 $r = 208 \text{ mm}$ 付近から高温壁面までの応力が一様になった場合においても、高温壁面での温度がより高いことによりその分クリープひずみ速度が大きいからである。なお、Case 1においてこのような現象がみられなかったのは、ひずみ硬化効果、即ち、高温壁面における累積クリープひずみ量が $r = 208 \text{ mm}$ 付近よりも多いため（ただし絶対値で）、仮りに $r = 208 \text{ mm}$ 付近と高温壁面における応力と温度がともに等しい場合にはひずみ硬化則により高温壁面におけるクリープひずみ速度の方が $r = 208 \text{ mm}$ 付近よりも小さくなるという効果が、上記の温度効果を打ち消したためであろうと思われる。

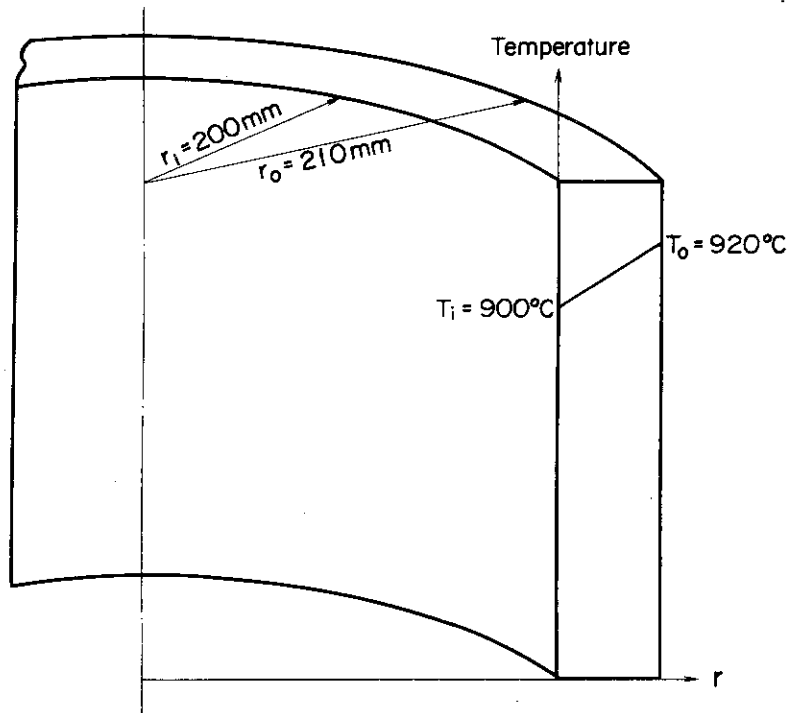
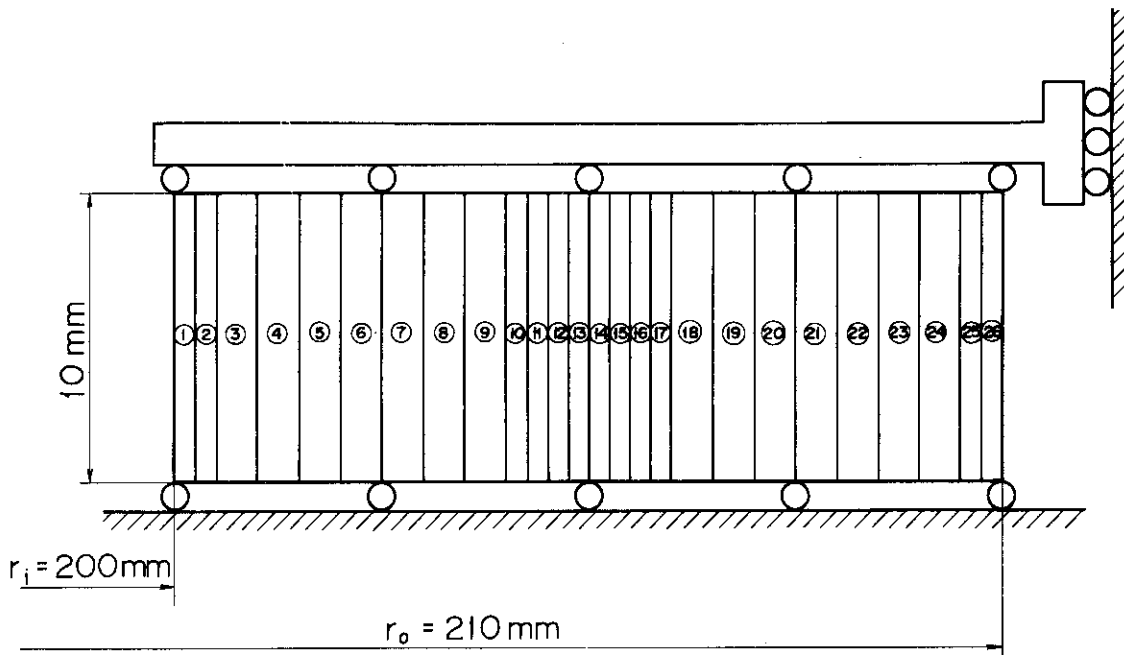


Fig. 3.1.1 Case 1



⊙ → Element Number

Fig.3.1.2 Case 1 の解析モデル



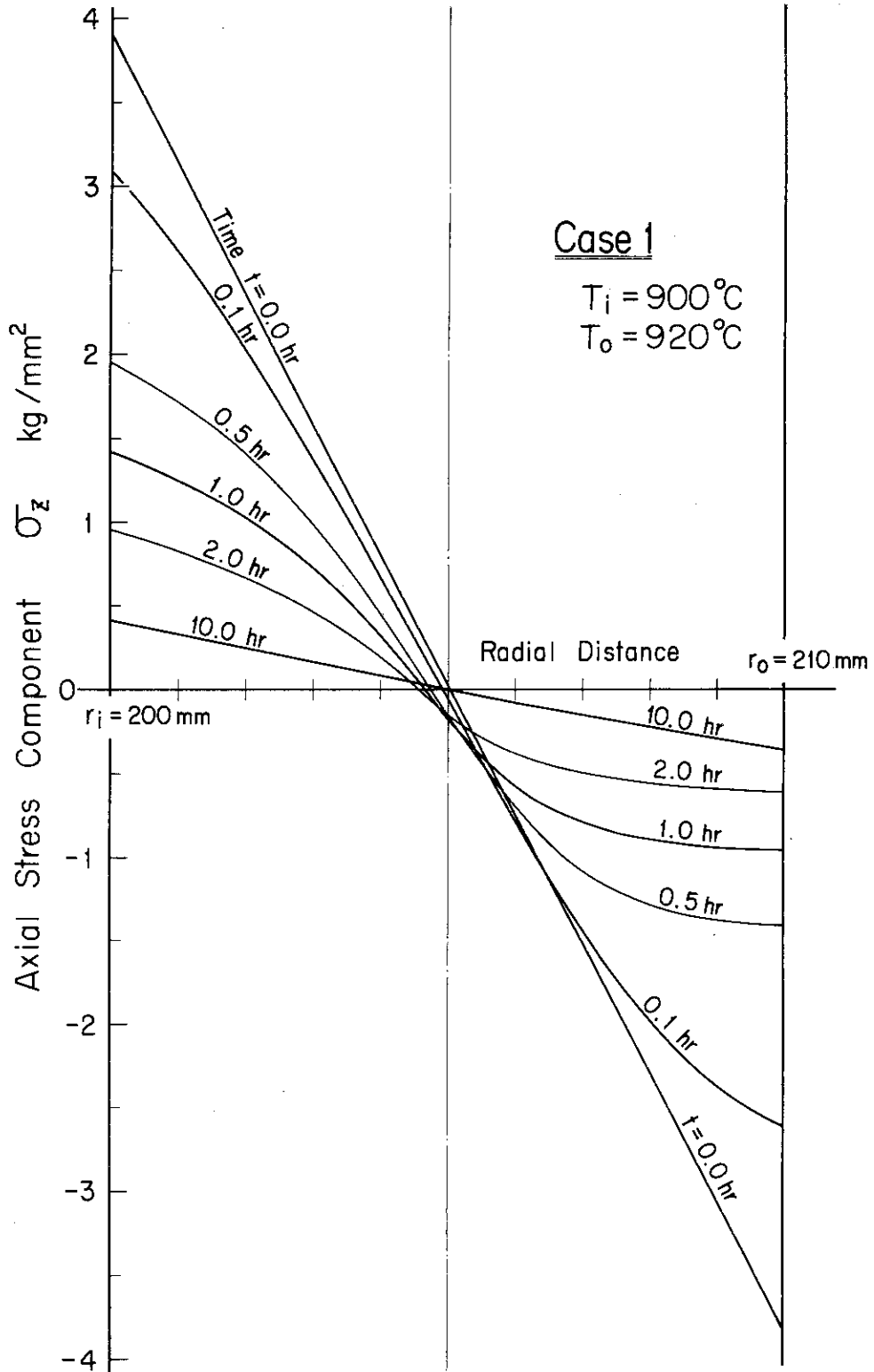


Fig. 3.1.3 Radial Distribution of  $\sigma_z$  for Case 1

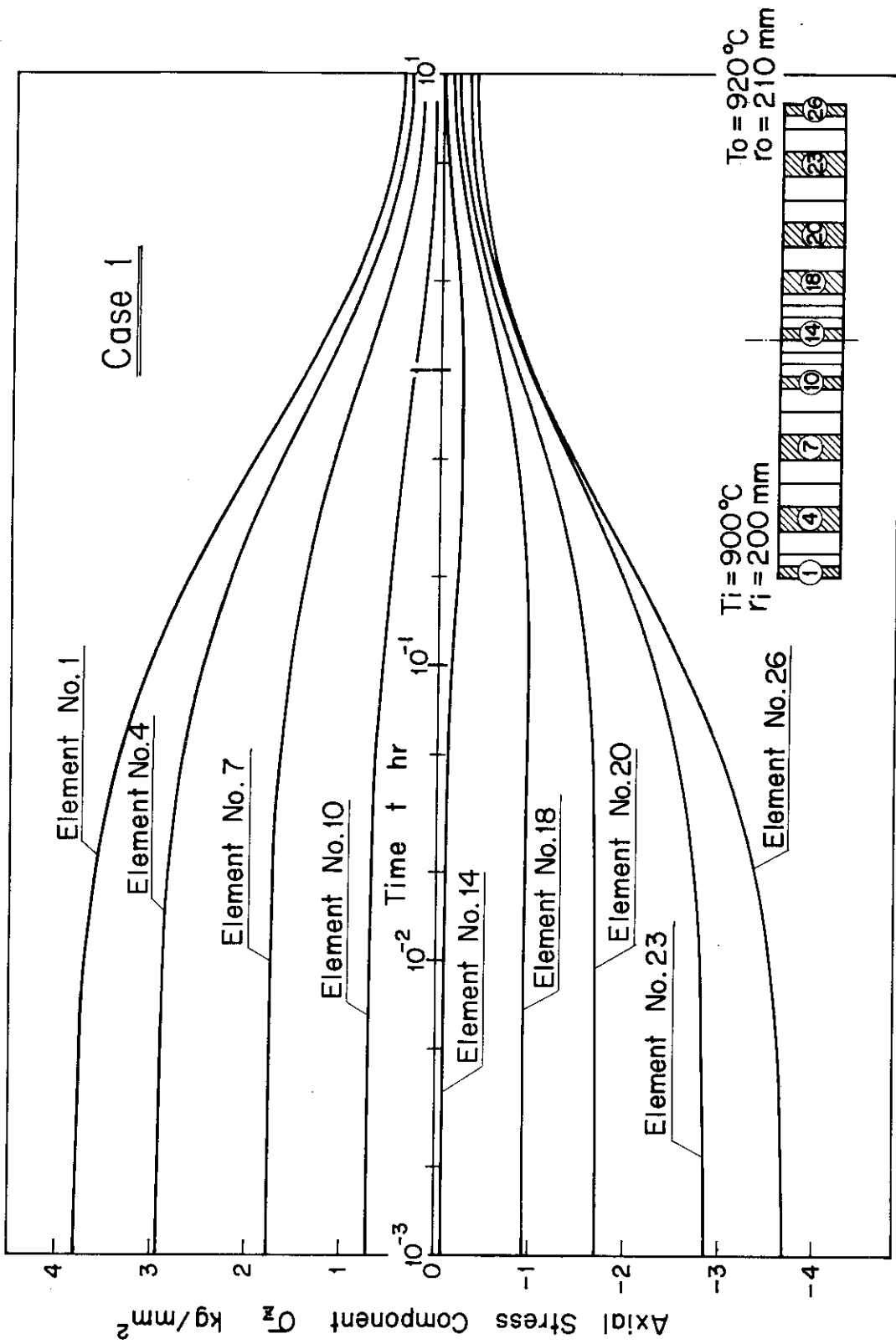


Fig. 3.1.4  $\sigma_z$  vs t of Various Elements for Case 1

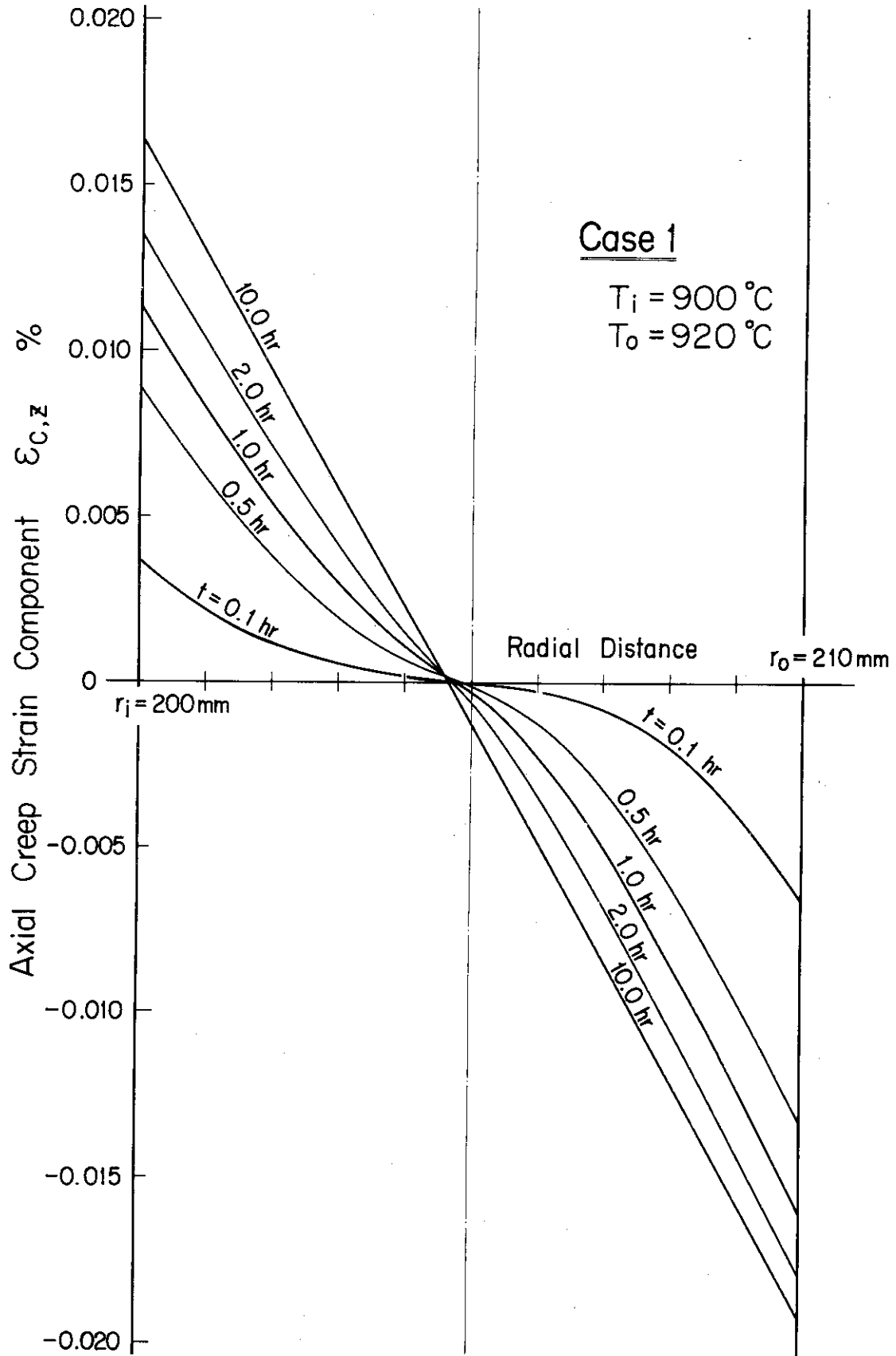


Fig. 3.1.5 Radial Distribution of  $\epsilon_{c,z}$  for Case 1

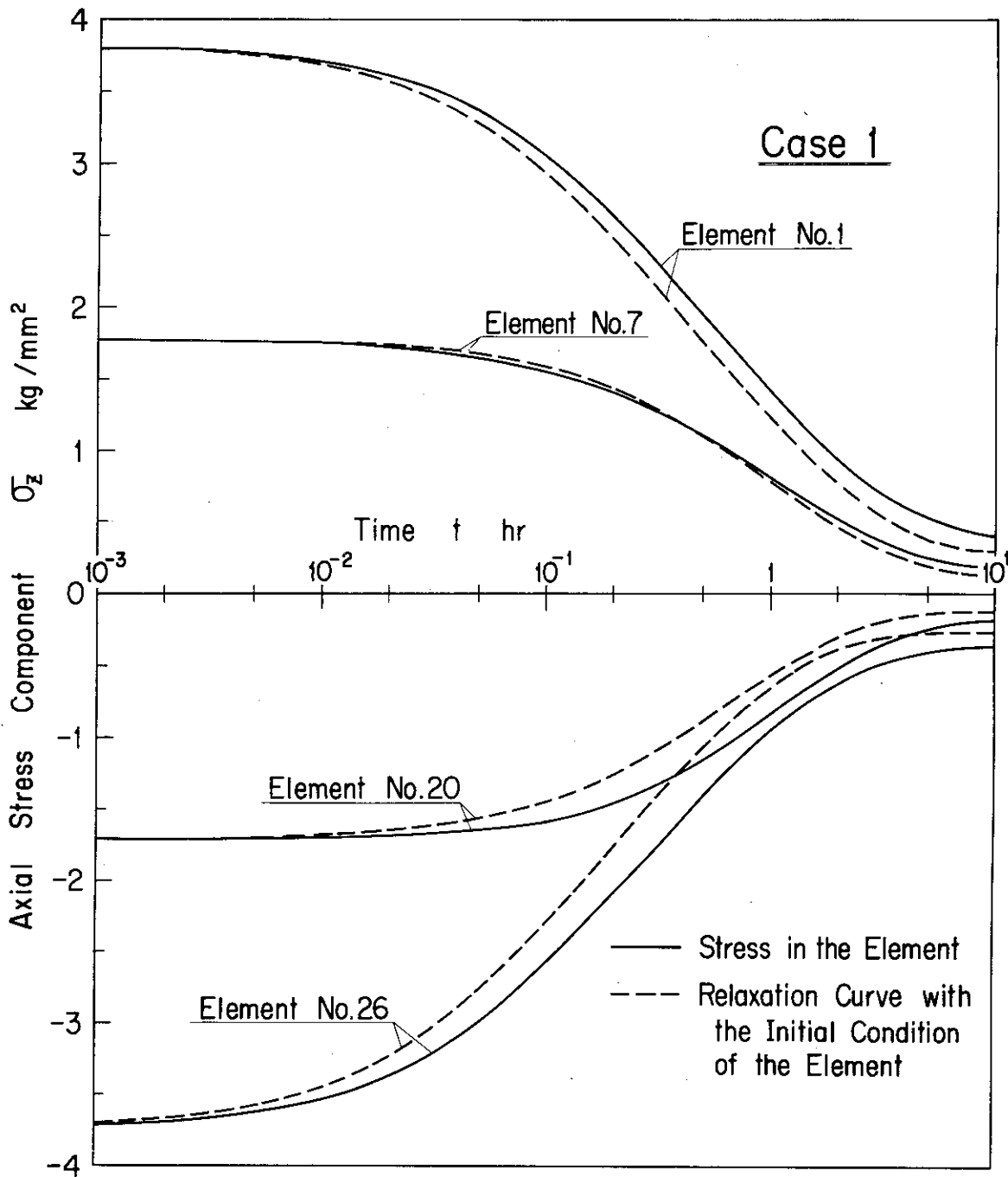


Fig. 3.1.6 Comparison between Element Stress and Relaxation Curve — Case 1

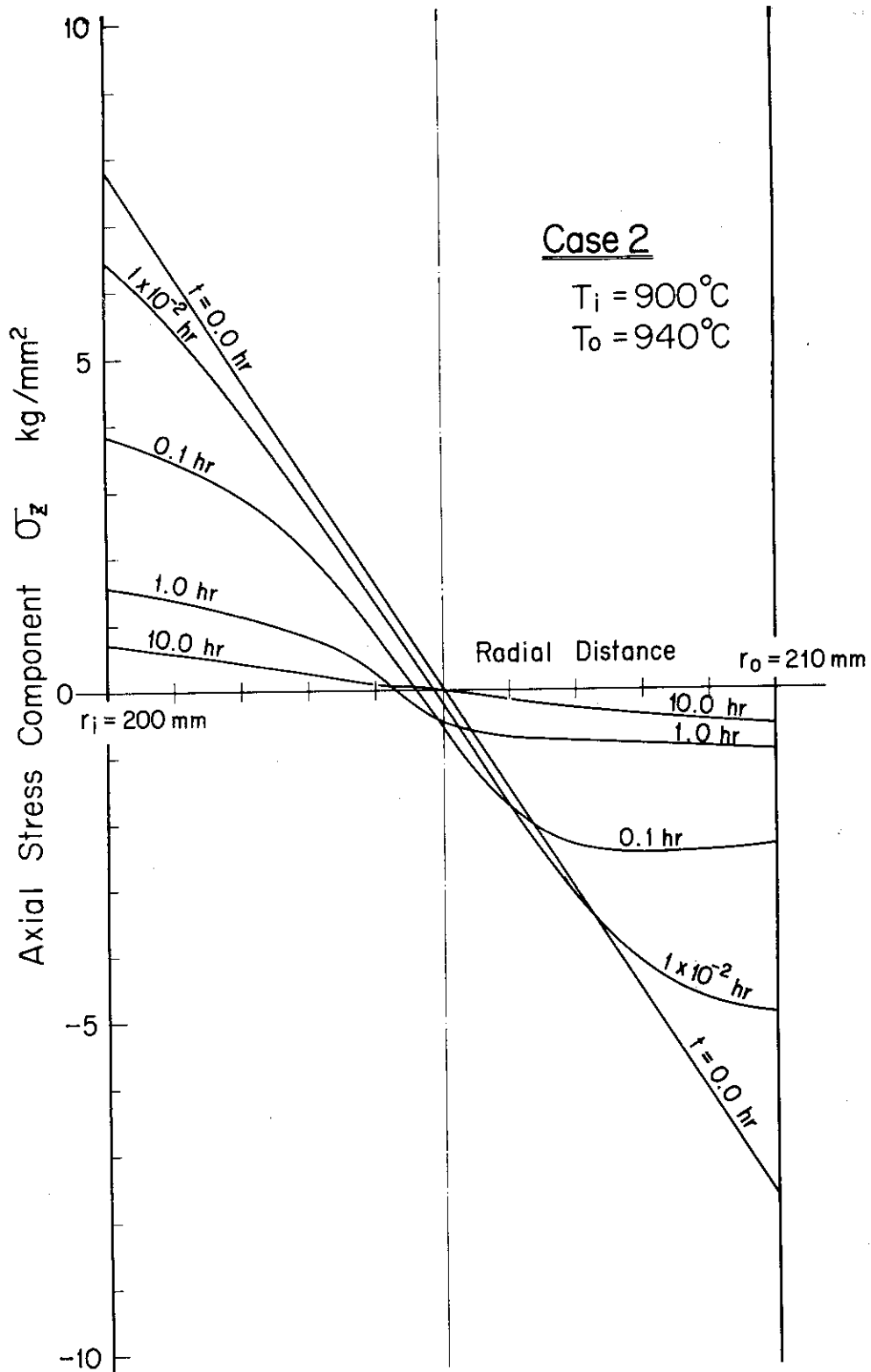


Fig. 3.1.7 Radial Distribution of  $\sigma_z$  for Case 2

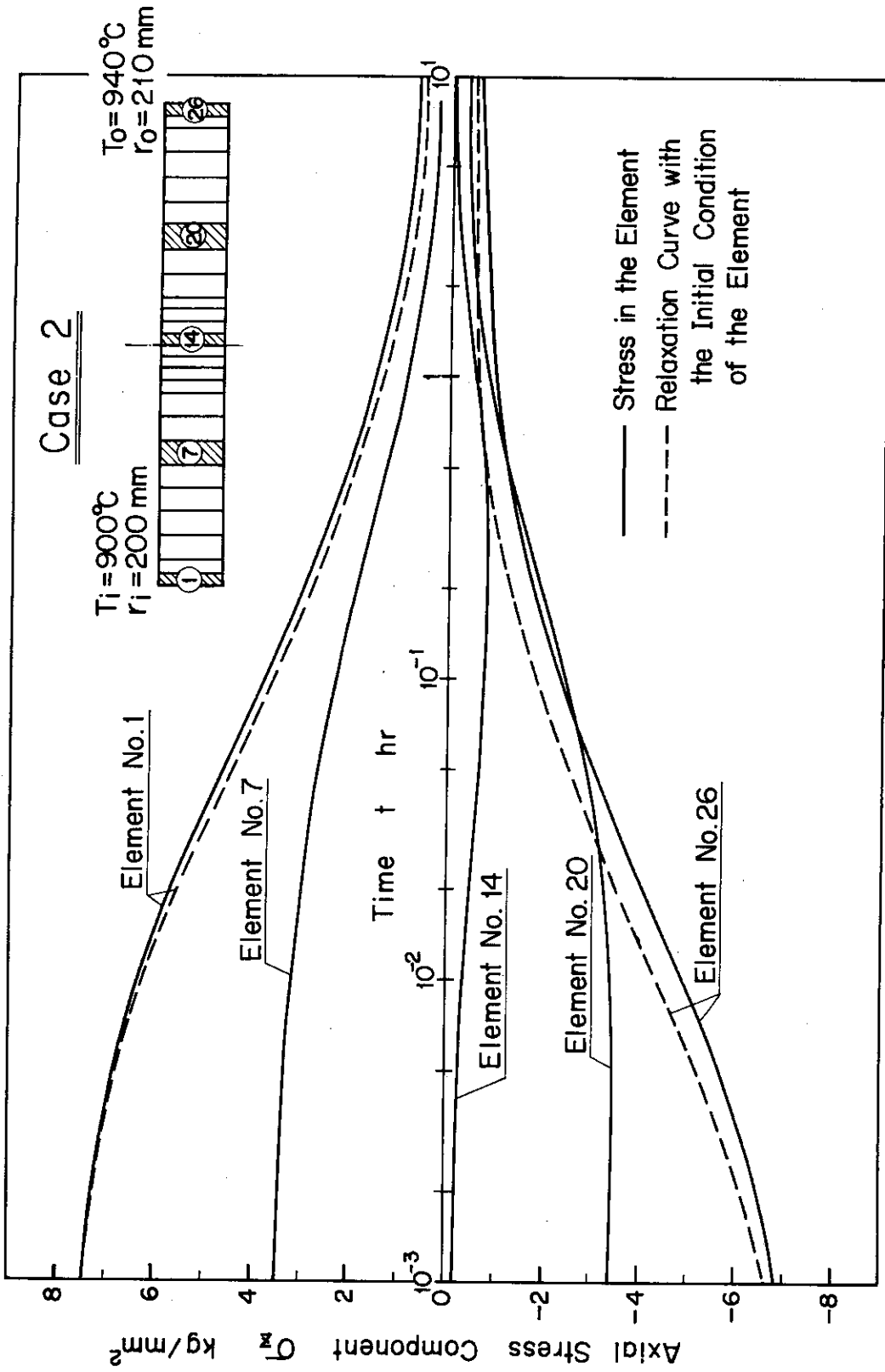


Fig. 3.1.8  $\sigma_z$  vs  $t$  of Various Elements for Case 2

### 3.2 熱応力+機械荷重による応力のリラクセーション

熱荷重の他に機械荷重、特に軸方向分布荷重  $p_z$  を同時に負荷した場合を解析する。

[Case 3]

#### 解析条件

解析モデルならびに温度分布条件はCase 1と同一であるが、Case 3においてはその他に軸方向分布荷重  $p_z = 4.0 \text{ kg/mm}^2$  を負荷する。 $p_z$  の負荷開始時間は  $t = 0$  とする。

#### 解析結果ならびにリラクセーション曲線との比較

軸方向応力成分  $\sigma_z$  の管壁内半径方向分布は時間の経過とともにFig. 3.2.1のように変化し、円周方向応力成分  $\sigma_\theta$  の壁内分布はFig. 3.2.2に示すように変化する。また、軸方向クリープひずみ成分  $\epsilon_{c,z}$  の壁内分布は時間の経過とともにFig. 3.2.3に示すように変化する。一方、要素ごとに  $\sigma_z$  の変化を追うとFig. 3.2.4に示すようになり、 $\epsilon_{c,z}$  の変化はFig. 3.2.5に示すようになる。なお、 $\epsilon_{c,z}$  の累積傾向と  $p_z$  のみによるクリープひずみの累積傾向とを比較するために、温度は壁中心での温度  $T = 910^\circ\text{C}$ 、応力は  $\sigma = p_z = 4.0 \text{ kg/mm}^2$  の場合のクリープ曲線をFig. 3.2.5中に破線で示す。また、Case 1で述べた方法によって得られるリラクセーション曲線との比較をFig. 3.2.4に示す。

これらの図から以下のことがわかる。

- (i) リラクセーションするに従って、軸方向応力成分  $\sigma_z$  の壁内分布は  $\sigma_z = p_z$  の一様分布に漸近し、一方、円周方向応力成分  $\sigma_\theta$  の壁内分布は  $\sigma_\theta = 0$  の一様分布に漸近する。
- (ii) 軸方向クリープひずみ成分  $\epsilon_{c,z}$  の壁内分布は、相対的には熱ひずみに平衡する分布に漸近していくが、絶対値としては壁内全域で時間とともに増加していく。 $\epsilon_{c,z}$  のこのような増加傾向を  $p_z$  のみが作用する場合のクリープひずみの増加傾向と比較してみると（たとえば、Fig. 3.2.5において、ほぼ壁中心での要素（要素番号14の要素）におけるクリープひずみ累積量と  $T = 910^\circ\text{C}$ 、 $\sigma = p_z$  に対するクリープ曲線（図中の破線）との比較）、 $p_z$  のみが作用する場合の累積量よりも  $\epsilon_{c,z}$  の方がやや多い。即ち、creep enhancementが生じている。
- (iii) リラクセーション曲線を用いて各要素のリラクセーション挙動を推測しようとする場合に、Case 1で述べた方法、即ち、要素の  $t = +0$  における応力を初期応力とするリラクセーション曲線そのものによりその要素のリラクセーション挙動が表現されるとする方法は不適當である。Case 3の場合には、リラクセーション曲線からリラクセーション挙動を推測する方法としては以下の方法の方が適切である。その方法とは、たとえば要素番号1の要素のリラクセーション挙動は、要素番号1と26の要素についてCase 1で述べた方法によって求められるリラクセーション曲線を用いて下式から推測するというものである（Fig. 3.2.6参照）。

$$\sigma_{z,1} = p_z + \frac{\sigma_{R,1}^z - \sigma_{R,26}^z}{2} \quad \dots\dots\dots (3.2.1)$$

ここで、

$\sigma_{z,1}$  = 要素番号1の要素の  $\sigma_z$

$\sigma_{R,1}^z$  = 要素番号1の要素の  $t = +0$  における  $\sigma_z$  を初期応力とするリラクセーション曲線から求められる応力

$\sigma_{R,26}^Z$  = 要素番号 26 の要素の  $t = +0$  における  $\sigma_Z$  を初期応力とするリラクゼーション曲線から求められる応力

要素番号 26 の要素については逆に下式から求める。

$$\sigma_{Z,26} = p_Z - \frac{\sigma_{R,1}^Z - \sigma_{R,26}^Z}{2} \dots\dots\dots (3.2.2)$$

なお、機械荷重  $p_Z$  による応力はリラクゼーションしないことから、 $p_Z$  による応力と熱応力とを分離し、この熱応力のリラクゼーション特性を Case 1 で述べた方法によるリラクゼーション曲線によって記述することにより、熱応力 +  $p_Z$  のリラクゼーション特性を推測する方法が考えられる。この方法によるリラクゼーション特性の推測は Case 1 のデータを引用すれば容易にできるので、その結果を詳細に述べることは省略するが、結論としては、リラクゼーション曲線の方が緩やかな応力減少を示す。これは、たとえば要素番号 1 の要素においてはこの要素の実際の応力が熱応力（ならびに、そのリラクゼーション残留応力）よりも  $p_Z$  分だけ大きく、かつ、クリープひずみ速度の応力依存性が  $\dot{\epsilon}_c \propto \sigma^n$  の形にすると  $n > 1$  であるために、(熱応力 +  $p_Z$ ) でのクリープひずみ速度が  $p_Z$  でのクリープひずみ速度とその熱応力でのクリープひずみ速度との和より大きくなり、その結果、その要素の累積クリープひずみ量から  $p_Z$  による累積クリープひずみ量を差し引いた相対的な累積クリープひずみ量が、リラクゼーション曲線のクリープひずみ量よりも多くなるからである。

### 3.3 まとめ

以上の三例から、リラクゼーション挙動に及ぼす機械荷重の効果を十分に把握し、その荷重負荷条件に即した初期応力値でのリラクゼーション曲線を用いれば、その構造物のリラクゼーション挙動をリラクゼーション曲線から推測することが可能であると言えよう。



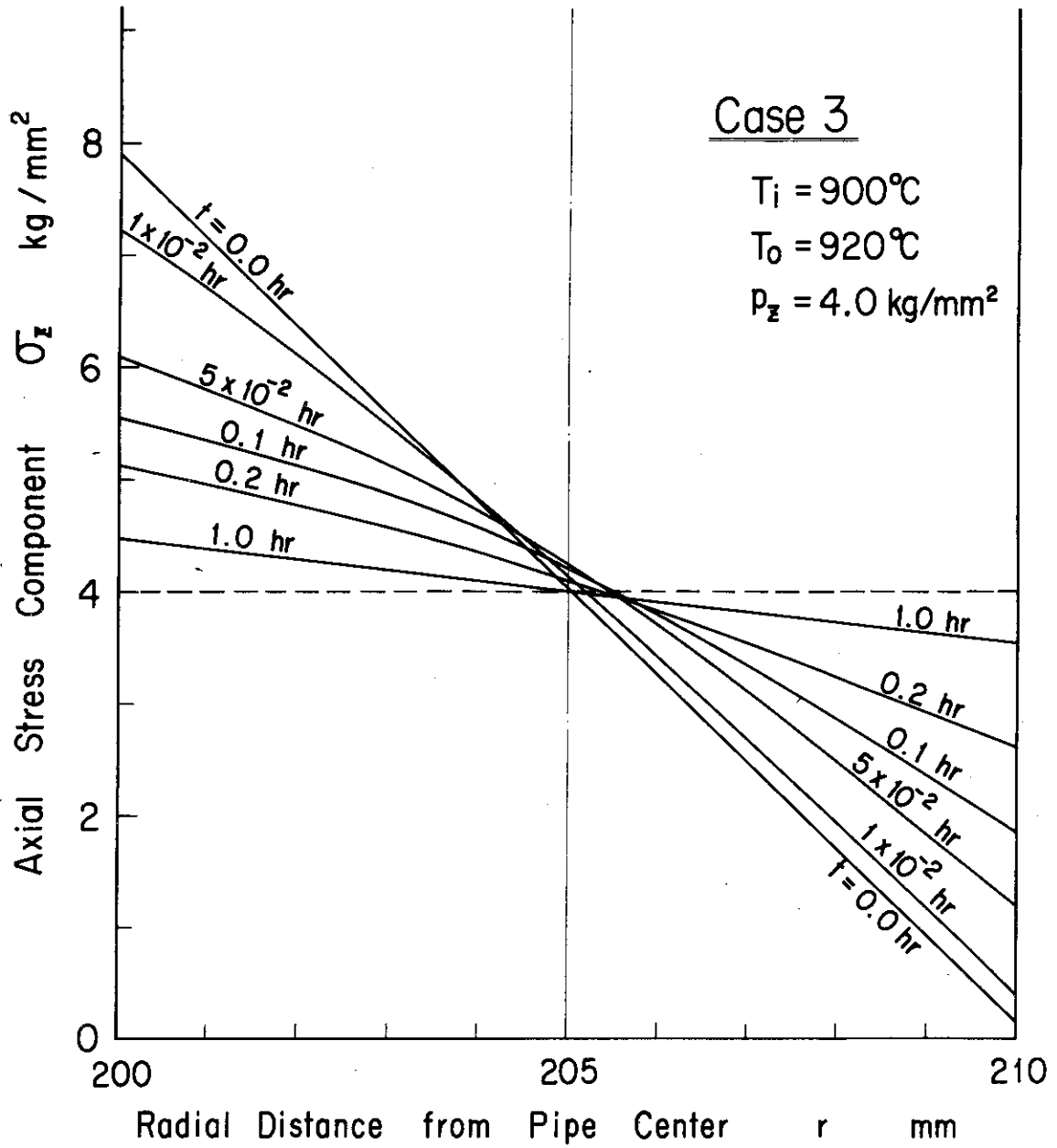


Fig. 3.2.1 Radial Distribution of  $\sigma_z$  for Case 3

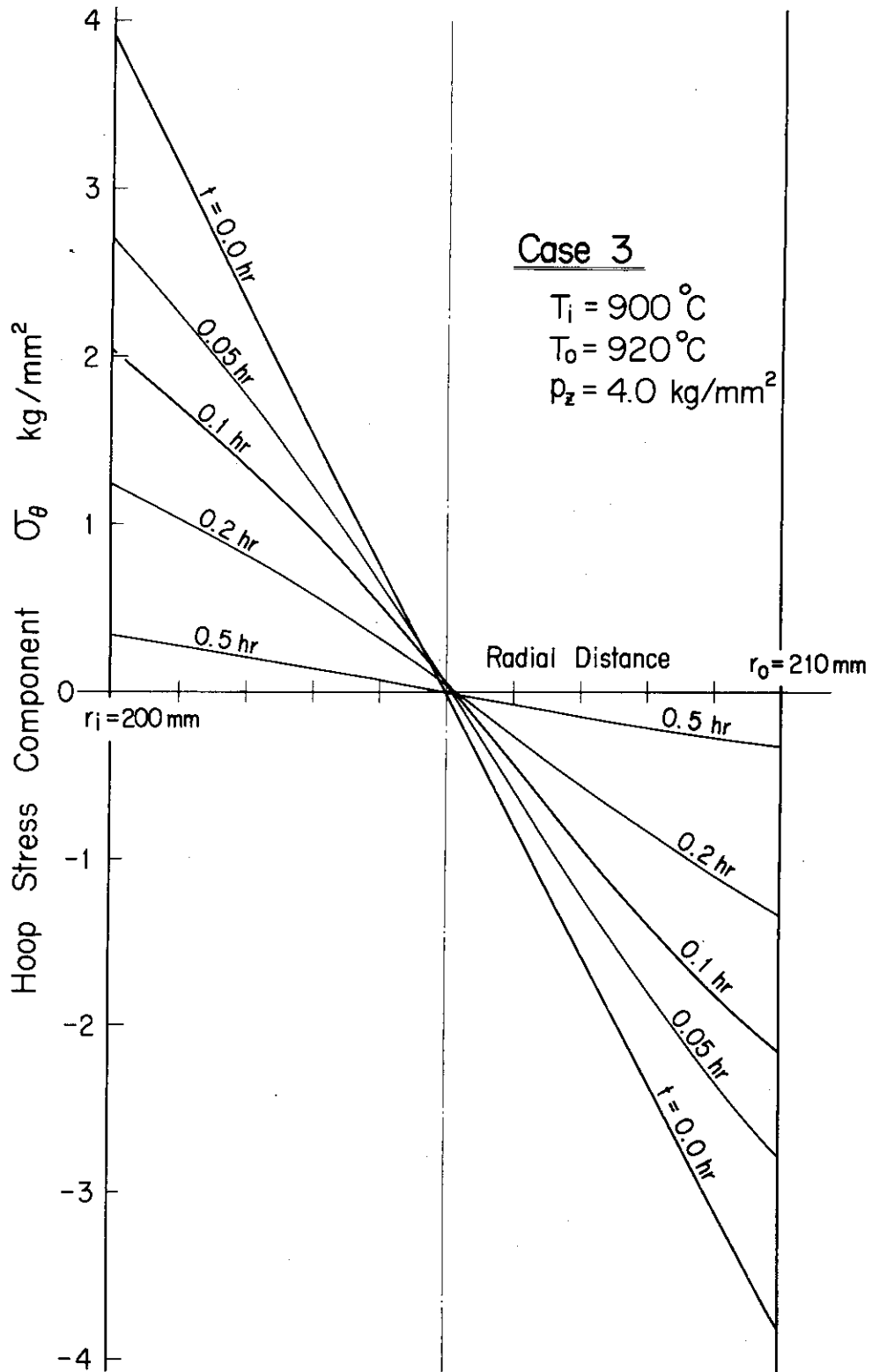


Fig. 3.2.2 Radial Distribution of  $\sigma_\theta$  for Case 3

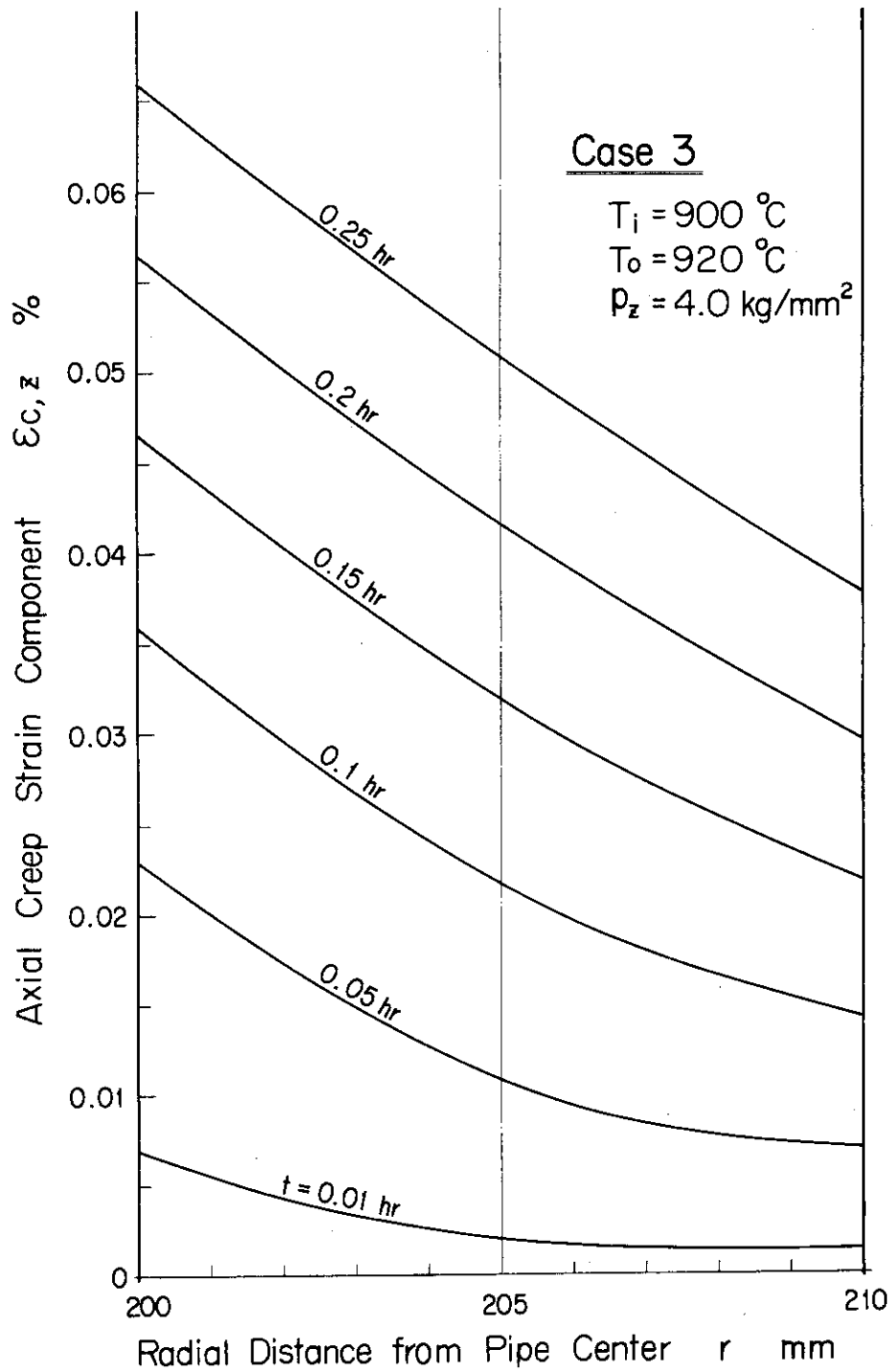


Fig. 3.2.3 Radial Distribution of  $\epsilon_{c,z}$  for Case 3

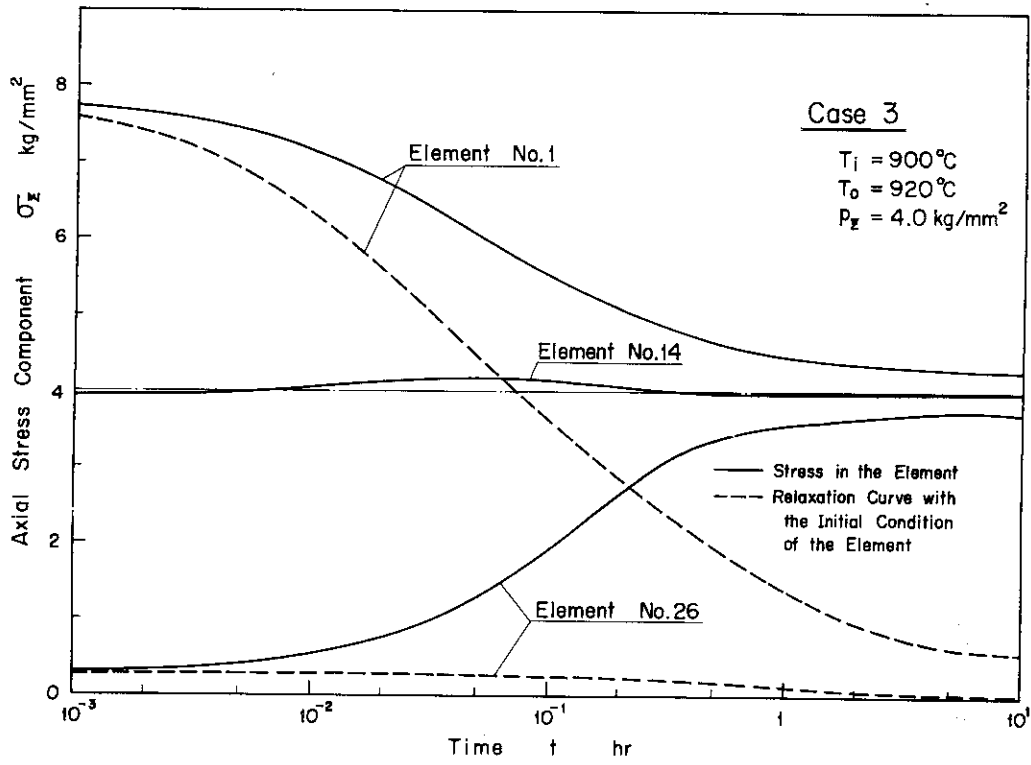


Fig. 3.2.4  $\sigma_z$  vs  $t$  of Various Elements for Case 3

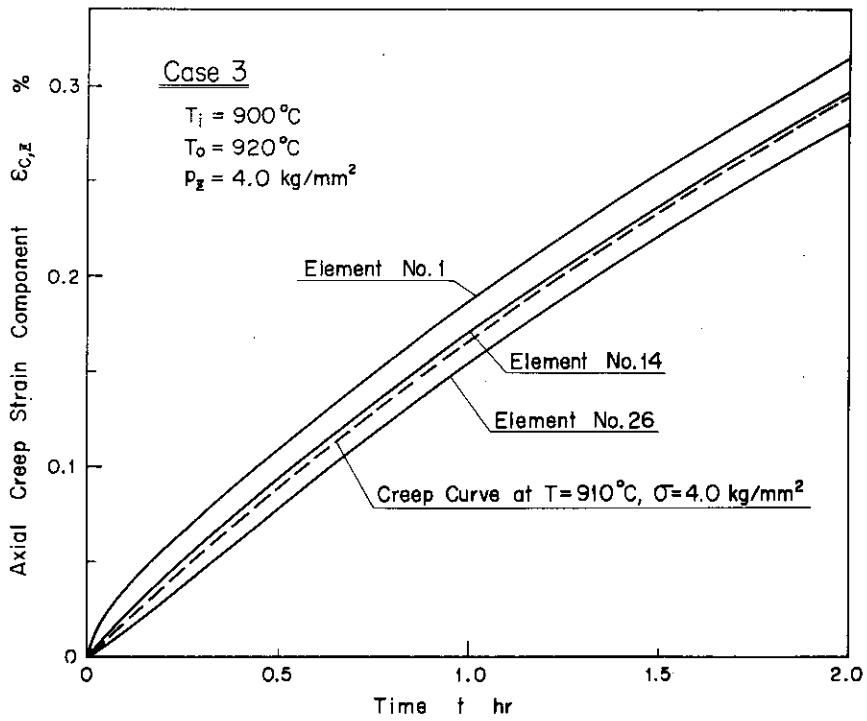


Fig. 3.2.5  $\epsilon_{c,z}$  vs  $t$  of Various Elements for Case 3

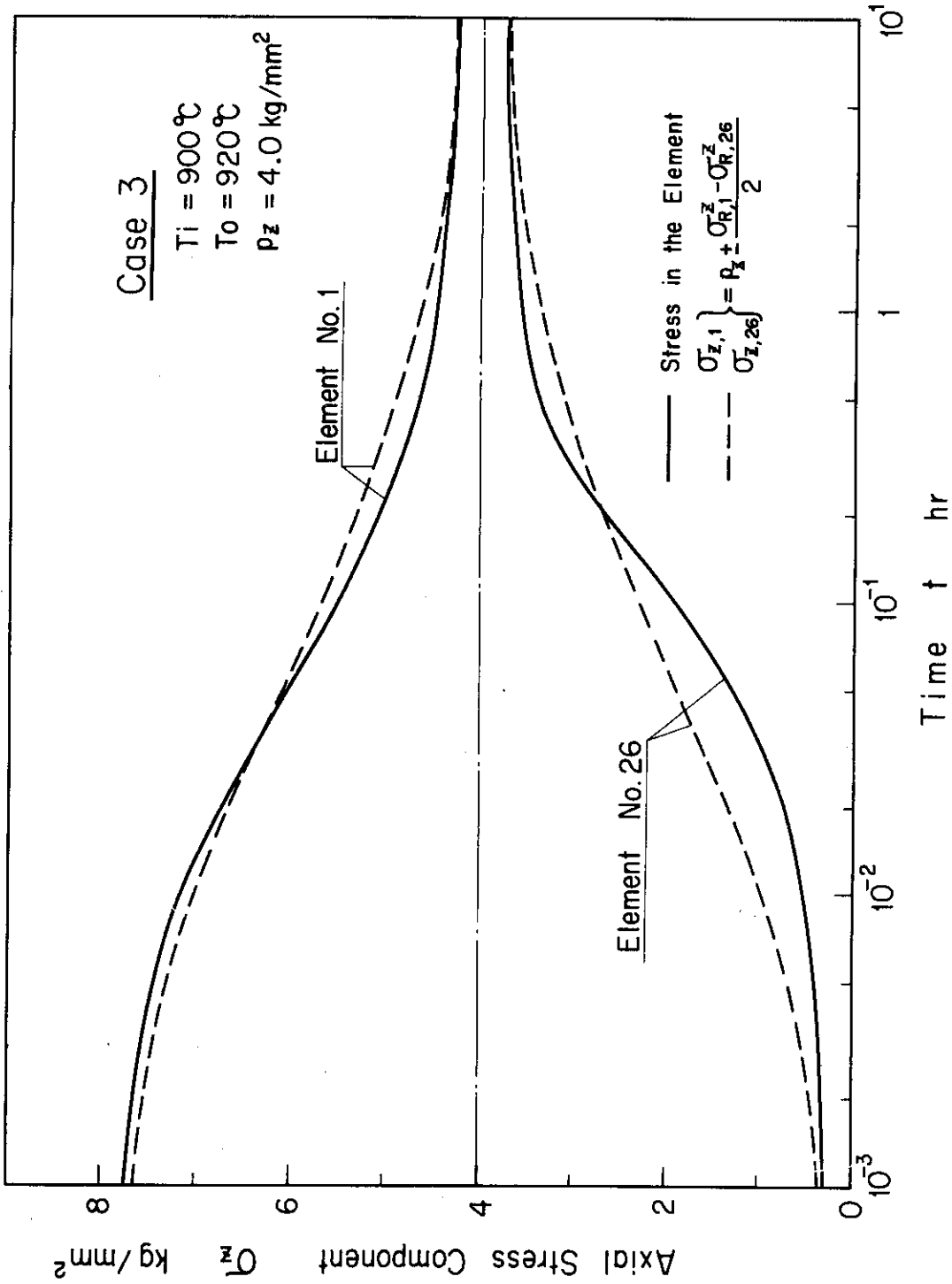


Fig. 3.2.6 Comparison with Eqs. (3.2.1), (3.2.2)

#### 4. クリープ構成方程式とリラクセーション特性との関係

本章では、クリープ構成方程式とリラクセーション条件とから、リラクセーション特性を表わす数式を誘導し、クリープ構成方程式とリラクセーション特性との関係を捜る。

##### クリープ構成方程式

第 2.1.3 項で述べたように、クリープひずみ速度  $\dot{\epsilon}_c$  は下式で表わされる。

$$\dot{\epsilon}_c = \epsilon_t r e^{-r t} + \dot{\epsilon}_{\min} \quad \dots\dots\dots (4.1.1)$$

なお、TEPICC-J ではクリープ則にひずみ硬化則を用いていることから、 $\tau$  は実時間ではなく、下式から求められる仮想時間である。

$$\epsilon_c = \epsilon_t (1 - e^{-r \tau}) + \dot{\epsilon}_{\min} \tau \quad \dots\dots\dots (4.1.2)$$

$\epsilon_c$  = 累積したクリープひずみ量

##### リラクセーション条件

$$\epsilon_c + \frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma_0}{E} \quad \dots\dots\dots (4.1.3)$$

ここで、 $\sigma_0$  = 初期応力

以上の前提のもとに解析するわけであるが、式(4.1.2)を仮想時間  $\tau$  について解くことは不可能である。そこで、二次クリープひずみ成分  $\dot{\epsilon}_{\min} \tau$  の項を無視して  $\epsilon_c$  は下式で表わされるとする。

$$\epsilon_c = \epsilon_t (1 - e^{-r \tau}) \quad \dots\dots\dots (4.1.2')$$

しかしながら、実際には  $\epsilon_t (1 - e^{-r \tau}) \gg \dot{\epsilon}_{\min} \tau$  という状況にはほとんどならない<sup>[注3]</sup> ので、この仮定は適切な仮定とは言い難い。いずれにせよ、式(4.1.2')の成立を仮定すると、クリープひずみ  $\epsilon_c$  におけるクリープひずみ速度  $\dot{\epsilon}_c$  は下式で表わされる。

$$\dot{\epsilon}_c = r (\epsilon_t - \epsilon_c) \quad \dots\dots\dots (4.1.4)$$

一方、式(4.1.3)を実時間  $t$  に関して微分すると、 $\dot{\epsilon}_c$  に関するもう一つ別の式を得る。即ち、

$$\dot{\epsilon}_c = -\dot{\sigma} / E \quad \dots\dots\dots (4.1.4')$$

式(4.1.4) = 式(4.1.4')より、

$$-\frac{\dot{\sigma}}{E} = r (\epsilon_t - \epsilon_c) \quad \dots\dots\dots (4.1.5)$$

となる。ところで、 $r$  は式(2.1.8)によって与えられるが、応力依存性に着目すると下式のように表わすことができる。

$$r = 10^{\gamma + \alpha \sigma + \beta T} = C_0 e^{\alpha_0 \sigma}$$

ただし,  $C_0 = 10^{\gamma + \beta T}$

$$\alpha_0 = \alpha \log_e 10$$

一方,  $\epsilon_t$  の応力依存性は,  $\sigma \geq 5 \text{ kg/mm}^2$  とすると, 次のように表わすことができる。

$$\epsilon_t = \epsilon_t(T) = \text{応力に関して一定} \equiv \bar{\epsilon}_t$$

これらの式ならびに式 ( 4.1.3 ) を式 ( 4.1.5 ) に代入すると次式を得る。

$$-\dot{\sigma} = -\frac{d\sigma}{dt} = C_0 e^{\alpha_0 \sigma} [(E \bar{\epsilon}_t - \sigma_0) + \sigma] \quad \dots\dots\dots (4.1.6)$$

ここで,  $E \bar{\epsilon}_t - \sigma_0 + \sigma$  の各項の大小関係を検討すると下記のようになることから,

$$E \bar{\epsilon}_t \geq 70 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_0 \leq 20 \text{ kg/mm}^2 \quad (\text{通常の高温構造物における荷重条件において})$$

$$\sigma \geq 5 \text{ kg/mm}^2$$

この  $E \bar{\epsilon}_t - \sigma_0 + \sigma$  を  $E \bar{\epsilon}_t$  で第 0 次近似する。即ち,

$$E \bar{\epsilon}_t - \sigma_0 + \sigma \rightarrow E \bar{\epsilon}_t$$

そうすると, 式 ( 4.1.6 ) は

$$-\frac{d\sigma}{dt} = C_0 e^{\alpha_0 \sigma} E \bar{\epsilon}_t$$

となる。上式を時間  $t$  に関して 0 から  $t_r$  まで積分すると次式を得る。

$$t_r = \frac{e^{-\alpha_0 \sigma_r} - e^{-\alpha_0 \sigma_0}}{E C_0 \alpha_0 \bar{\epsilon}_t}$$

ここで,  $\sigma_r$  = 時間  $t_r$  における残留応力

上式に  $C_0 = 10^{\alpha + \beta T}$ ,  $\alpha_0 = \alpha \log_e 10$  を代入すると, 次式を得る。

$$t_r = \frac{1/r(\sigma = \sigma_r) - 1/r(\sigma = \sigma_0)}{E \alpha \bar{\epsilon}_t \log_e 10} \quad \dots\dots\dots (4.1.7)$$

ここで,

$$r(\sigma = \sigma_r) = \text{応力 } \sigma \text{ が } \sigma_r \text{ における } r。$$

$r (\sigma = \sigma_0) =$  応力  $\sigma$  が初期応力  $\sigma_0$  における  $r$ 。

更に,  $r \cdot t_1 = 4.60517$  という関係を上式に代入すると下式となる。

$$t_r = \frac{t_1 (\sigma = \sigma_r) - t_1 (\sigma = \sigma_0)}{4.60517 \cdot \log_{e10} \cdot E \cdot \alpha \cdot \bar{\epsilon}_t} \quad \dots\dots\dots (4.1.8)$$

この式 (4.1.8) から求められるリラクセーション値と第2章で求められたリラクセーション値とを比較すると, たとえば Fig. 4.1.1 のようになる。この図から, 上式による推測値の精度自体はあまり良くないが, 傾向は概ね良好に推測することができる。従って, オーダー推定程度であれば一応有効であろう。

いずれにせよ, 式 (4.1.8) から以下のようなことがわかる。

- (i) 当然のことながら, クリープ構成方程式を構成するパラメータ全てがリラクセーション特性に関係する。
- (ii) これらのパラメータ  $\epsilon_t, t_1$  のうち, 式 (4.1.8) を導くに際しても応力依存性を考慮した  $t_1$  に着目すると, 応力  $\sigma_r$  での  $t_1$  と初期応力  $\sigma_0$  での  $t_1$  とが両者の差の形で  $t_r$  に関係しているが,  $\sigma_0$  と  $\sigma_r$  との中間の応力での  $t_1$  は結果的には関係していない。
- (iii)  $t_r$  は最大一次クリープひずみ成分  $\bar{\epsilon}_t$  の逆数に比例する。
- (iv)  $t_r$  は縦弾性係数  $E$  にも依存する。

なお, (ii), (iii) は式 (4.1.8) を言葉で説明したものであって, 一般的な場合 (即ち,  $\epsilon_c$  が式 (4.1.2) によって表わされる場合) にも成立するかどうかは不明である。

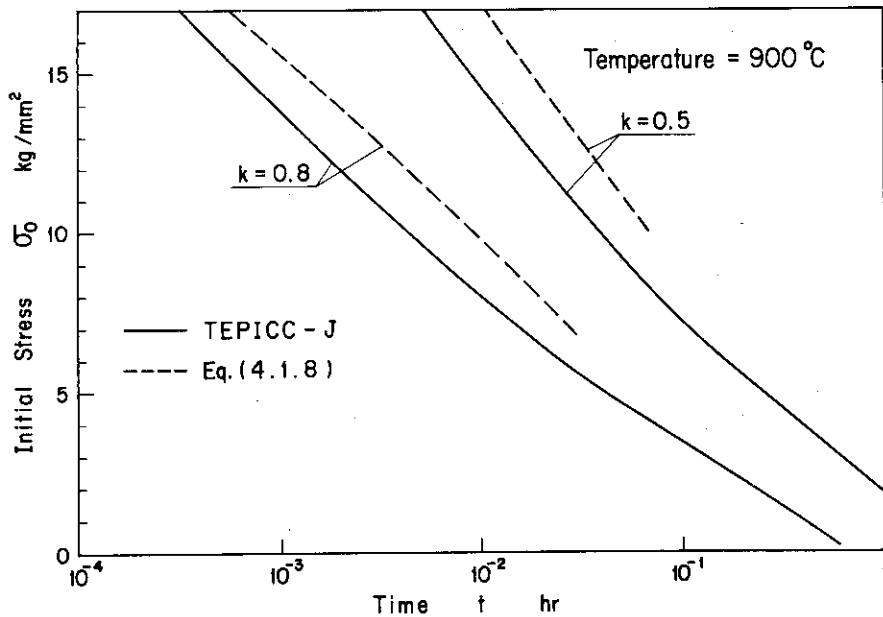


Fig. 4.1.1 Comparison with Eq. (4.1.8)

〔注3〕 たとえば,  $T = 900^\circ\text{C}$ ,  $\sigma = 10.0 \text{ kg/mm}^2$  においては

$$\dot{\epsilon}_{\min} = 3.37\% / \text{hr}, \quad \epsilon_t = 0.45\%, \quad r = 6.38 \text{ hr}^{-1}, \quad t_1 = 0.722 \text{ hr}$$

であるので, たとえば  $\tau = 0.05 \text{ hr}$  においては

$$\epsilon_t (1 - e^{-r\tau}) = 0.123\%, \quad \dot{\epsilon}_{\min} \tau = 0.169\%$$

となる。即ち, 以下の状況にある。

$$\epsilon_t (1 - e^{-r\tau}) \cong \dot{\epsilon}_{\min} \tau$$



## 5. あとがき

非弾性応力解析コードTEPICC-Jを用いて、先に作成した Hastelloy X のクリープ構成方程式から Hastelloy X のリラクセーション特性を推測した。これらのリラクセーションデータは、ORNL-5479 のリラクセーション試験データと良好に一致することから、有意なデータであると言えよう。

また、実際の高温構造物におけるリラクセーション挙動の非弾性応力解析結果とリラクセーション曲線による推測値との比較から、機械荷重や構造物の形状等がリラクセーション挙動に及ぼす効果を十分に把握し、それらの条件に即した初期応力値でのリラクセーション曲線を用いれば、その構造物のリラクセーション挙動をリラクセーション曲線から推測することが可能であるということがわかった。

### 謝 辞

本報を作成するうえで御指導いただいた当研究室の武藤 康氏に深く感謝の意を表します。

### 〔文 献〕

- (1) 鈴木, 武藤, 日本機械学会講演論文集No.790-13 (1979-10, 第57期全国大会)  
P 9~11.
- (2) M. K. Booker, ORNL-5479 (Feb. 1979).

## 5. あとがき

非弾性応力解析コードTEPICC-Jを用いて、先に作成した Hastelloy X のクリープ構成方程式から Hastelloy X のリラクセーション特性を推測した。これらのリラクセーションデータは、ORNL-5479 のリラクセーション試験データと良好に一致することから、有意なデータであると言えよう。

また、実際の高温構造物におけるリラクセーション挙動の非弾性応力解析結果とリラクセーション曲線による推測値との比較から、機械荷重や構造物の形状等がリラクセーション挙動に及ぼす効果を十分に把握し、それらの条件に即した初期応力値でのリラクセーション曲線を用いれば、その構造物のリラクセーション挙動をリラクセーション曲線から推測することが可能であるということがわかった。

### 謝 辞

本報を作成するうえで御指導いただいた当研究室の武藤 康氏に深く感謝の意を表します。

### 〔文 献〕

- (1) 鈴木, 武藤, 日本機械学会講演論文集No.790-13 (1979-10, 第57期全国大会)  
P 9~11.
- (2) M. K. Booker, ORNL-5479 (Feb. 1979).

## 5. あ と が き

非弾性応力解析コードTEPICC-Jを用いて、先に作成した Hastelloy X のクリープ構成方程式から Hastelloy X のリラクセーション特性を推測した。これらのリラクセーションデータは、ORNL-5479 のリラクセーション試験データと良好に一致することから、有意なデータであると言えよう。

また、実際の高温構造物におけるリラクセーション挙動の非弾性応力解析結果とリラクセーション曲線による推測値との比較から、機械荷重や構造物の形状等がリラクセーション挙動に及ぼす効果を十分に把握し、それらの条件に即した初期応力値でのリラクセーション曲線を用いれば、その構造物のリラクセーション挙動をリラクセーション曲線から推測することが可能であるということがわかった。

### 謝 辞

本報を作成するうえで御指導いただいた当研究室の武藤 康氏に深く感謝の意を表します。

### 〔文 献〕

- (1) 鈴木, 武藤, 日本機械学会講演論文集No.790-13 (1979-10, 第57期全国大会)  
P 9~11.
- (2) M. K. Booker, ORNL-5479 (Feb. 1979).