

J A E R I - M
90-148

高温工学試験研究炉高温構造設計方針
材料強度基準等の作成方法の検討

1990年9月

羽田 一彦・元木 保男・馬場 治

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

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)あて、
お申しこみください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-11 茨城県那珂郡
東海村日本原子力研究所内)で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 ニッセイエプロ株式会社

高温工学試験研究炉高温構造設計方針材料強度基準等の作成方法の検討

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

羽田 一彦・元木 保男・馬場 治

(1990年8月6日受理)

本報告書は、「高温工学試験研究炉第1種機器の高温構造設計方針」で用いている設計応力強さ等の材料強度基準等の作成方法を定め、この方法に基づいて、「高温工学試験研究炉高温構造設計方針材料強度基準等」を作成したものである。材料強度基準等を定めている材料は、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼焼きならし焼き戻し材(NT材)-HTTR仕様材、ニッケル基耐食耐熱超合金のハスティロイXR並びにオーステナイト系ステンレス鋼のSUS321TB及びSUS316である。

$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼NT材-HTTR仕様材及びオーステナイト系ステンレス鋼については、高速原型炉「もんじゅ」用に定めた「高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準等」を準用した。また、ヘリウム環境効果及び中性子照射効果について検討し、HTTRの使用条件内であれば材料強度基準等への影響がないことを明らかにした。

ハスティロイXRについては、「高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準等」に含まれていない材料であるため、材料特性を十分に検討して作成方法を定めた。特に検討した項目は、引張特性に関しては、高温で動的再結晶が生ずることに対し引張試験方法を含めた基本的な対応策の策定、クリープ特性に関しては、クリープ破断データの統計処理法並びにクリープ式の作成方法である。更に、ヘリウム環境効果についての評価方法を定めた。ハスティロイXRの材料強度基準等は、日本原子力研究所並びに国内の関連研究機関で取得した材料試験データに基づき、この作成法に従って統計解析を行なう材料特性データ管理解析コードData MAC-HTTRを用いて定めている。

Development of Methods for Generating Design Allowable
Limits for the HTTR High-Temperature Structural
Design Code

Kazuhiko HADA, Yasuo MOTOKI and Osamu BABA

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 6, 1990)

This report gives methods for generating the design allowable limits for the High-Temperature Structural Design Code for the Class 1 Components of the HTTR and their values generated. Structural materials involved are the HTTR specification of a normalized and tempered (NT) material of 2 1/4 Cr-1Mo steel, a nickel-base helium-gas corrosion-resistant and heat-resistant superalloy Hastelloy XR, and two kinds of austenitic stainless steels SUS321TB and SUS316.

The design allowable limits for the 2 1/4Cr-1Mo steel NT-material HTTR-spec. and the austenitic stainless steels are reproduced from the Design Allowable Limits for the Elevated Temperature Structural Design Guide for the Prototype Fast Breeder Reactor "Monju" (FBR Code), through examining the applicability of the these values for 2 1/4Cr-1Mo steel NT-material to its HTTR-specification in which contents of some impurities are lowered so as to maintain sufficient fracture toughness.

For Hastelloy XR, the material properties are reviewed at first and then the principles are established for generating the design allowable limits, because this material is not involved in the FBR Code. Special considerations were taken into dynamic recrystallization which is developed at high temperatures above about 850°C and in a high strain rate range, statistical treatment method of creep rupture life data, and a method for

developing a creep equation (i.e., a correlation of creep data from uniaxial creep tests). An evaluation guideline for helium environmental effects is also specified. The design allowable limits for Hastelloy XR are generated from available material data with using a computer code "Data MAC-HTTR" for managing and analyzing material properties data.

Keywords: Design Allowable Limits, Class 1 Components, 2 1/4Cr-1Mo Steel, Hastelloy XR, Austenitic Stainless Steels, Irradiation Effect, Helium Environmental Effect, HTTR

目 次

1.はじめに	1
2.高温工学試験研究炉第1種機器の使用材料と使用条件	2
3.材料強度基準等の作成方法	6
3.1 作成の基本的考え方	6
3.2 2 1/4 Cr-1 Mo鋼 NT材-HTTR仕様材	8
3.2.1 FBR方針材料強度基準等の適用性	8
3.2.2 ヘリウム環境効果及び中性子照射効果	8
3.2.3 材料強度基準等の作成方法	9
3.3 オーステナイト系ステンレス鋼	12
3.4 ハスティロイ X R	13
3.4.1 材料特性	13
3.4.1.1 引張特性	13
3.4.1.2 クリープ特性	14
3.4.1.3 疲労特性	15
3.4.1.4 クリープ疲労相互作用	16
3.4.1.5 検討結果	17
3.4.2 材料強度基準等	17
3.4.2.1 最大許容応力強さ S_o	17
3.4.2.2 設計応力強さ S_m	18
3.4.2.3 設計応力強さ S_t	18
3.4.2.4 設計降伏点 S_y	19
3.4.2.5 設計クリープ破断応力強さ S_r	20
3.4.2.6 設計引張強さ S_u	21
3.4.2.7 設計緩和強さ S_e	21
3.4.2.8 許容ひずみ範囲 ϵ_t	22
3.4.2.9 等時応力-ひずみ線図	22
3.4.2.10 縦弾性係数 E	23
3.4.2.11 ポアソン比 ν	23
3.4.2.12 熱膨張係数 α	23
3.4.2.13 累積クリープ疲労損傷係数の制限値 D	23
3.4.2.14 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*	23
3.4.2.15 ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}	24
3.4.2.16 ヘリウム環境効果(くされ代)	24
3.4.2.17 クリープ式	24

4. 材料強度基準等の作成	46
謝辞	47
参考文献	48
「高温工学試験研究炉高温構造設計方針材料強度基準等」	51

Contents

1. Introduction	1
2. Structural Materials and Their Service Conditions for the HTTR Class 1 Components	2
3. Methods for Generating Design Allowable Limits	6
3.1 Principles for generation	6
3.2 HTTR specification of NT material of 2 1/4Cr-1Mo steel	8
3.2.1 Application of the FBR code design allowable limits	8
3.2.2 Helium-environmental effect and irradiation effect	8
3.2.3 Methods for generating the design allowable limits	9
3.3 Austenitic stainless steels	12
3.4 Hastelloy XR	13
3.4.1 Material characterization	13
3.4.1.1 Tensile property	13
3.4.1.2 Creep property	14
3.4.1.3 Fatigue property	15
3.4.1.4 Creep-fatigue interaction	16
3.4.1.5 Concluding remarks	17
3.4.2 Design allowable limits	17
3.4.2.1 Maximum allowable stress intensity S_o	17
3.4.2.2 Allowable stress intensity S_m	18
3.4.2.3 Allowable stress intensity S_t	18
3.4.2.4 Design yield strength S_y	19
3.4.2.5 Expected minimum stress-to-rupture S_R	20
3.4.2.6 Design ultimate tensile strength S_u	21
3.4.2.7 Design relaxation strength S_r	21
3.4.2.8 Design fatigue strain range ϵ_t	22
3.4.2.9 Average isochronous stress-strain curves	22
3.4.2.10 Modulus of elasticity E	23
3.4.2.11 Poisson's ratio ν	23
3.4.2.12 Mean coefficient of thermal expansion α	23
3.4.2.13 Total creep-fatigue damage D	23
3.4.2.14 Creep damage during relaxation of primary and secondary stresses D^*	23

3.4.2.15	Creep damage during relaxation of peak stress D**	24
3.4.2.16	Helium environmental effect (corrosion allowance)	24
3.4.2.17	Creep equation	24
4.	Generation of Design Allowable Limits	46
	Acknowledgements	47
	References	48
"Design Allowable Limits for the HTTR High-Temperature Structural Design Code"	51	

1. はじめに

高温工学試験研究炉の原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器、即ち、高温工学試験研究炉第1種機器は、高温で使用する。従って、これらの高温機器の構造設計を行なうには高温構造設計方針が必要になる。日本原子力研究所（以下、単に「原研」と称する。）では、このため、「高温工学試験研究炉第1種機器の高温構造設計方針」⁽¹⁾（以下、単に「高温構造設計方針」と称する。）を作成している。本報告書は、この高温構造設計方針で用いている設計応力強さ等の材料強度基準等の作成方法を定め、この方法に基づいて材料強度基準等を作成したものである。

高温工学試験研究炉第1種機器の構造材料としては、低合金鋼の2 1/4 Cr-1 Mo 鋼焼きならし焼き戻し材(NT材) - HTTR仕様材、SUS 321TB 及び SUS 316 のオーステナイト系ステンレス鋼並びにニッケル基耐食耐熱超合金のハスティロイ XR (Ni-Cr-Mo-Fe合金) を使用する。2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT材 - HTTR仕様材は、約 550°Cまでの高温で厚肉材として使用実績が豊富な2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT材を基に、HTTRの使用条件下（約 400°Cで20年間使用し、原子炉圧力容器材として中性子照射下でも使用する。）でも十分な韌性を確保するように、脆化の原因となる Si, P 等の不純物含有量を適切に制限したものである。また、ハスティロイ XRは、ジェットエンジンの燃焼筒として使用実績が豊富で約 900°Cという超高温でも十分な強度を有するハスティロイ Xを、原子炉冷却材（ヘリウムガス）雰囲気中においても優れた耐食性を有するように改良したものである。

これらの材料に対する材料強度基準等を作成するための材料データを効率良く取得するため、著者らは、高温工学試験研究炉での使用条件を考慮し、特に重要な材料特性については重点的にデータを取得することとして、引張試験、クリープ試験等の材料試験の試験条件、取得データ点数を定めた。この試験計画に基づき、原研、金属材料技術研究所、原子力メーカー等において精力的に材料試験を実施してきた。著者らは、取得した材料データに基づき、上記材料の材料特性を検討し、材料強度基準等の作成方法を定めた。この材料強度基準等の作成方法については、原研内の専門家による検討を行ない、更に、所外の専門家による検討も仰ぐこととし、昭和59年度～61年度に財団法人 原子力安全研究協会（以下、「原安協」と称する。）に委託し、同協会内に「高温ガス炉安全基準調査専門委員会・高温構造設計分科会」（主査：矢川元基 東京大学教授）を設け、検討が加えられた^{(2),(3)}。

本報告書の第2章では、高温工学試験研究炉第1種機器に使用する材料の使用条件等を明らかにし、第3章では、上記の検討結果を反映して定めた材料強度基準等の作成方法を示す。この作成方法に基づいて作成した材料強度基準等を「高温工学試験研究炉高温構造設計方針材料強度基準等」として添付する。

2. 高温工学試験研究炉第1種機器の使用材料と使用条件

高温工学試験研究炉第1種機器（原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する箇所）の材料には、
2 1/4 Cr - 1 Mo鋼NT材 - HTTR仕様材、オーステナイト系ステンレス鋼のSUS 321TB 及び
SUS 316 並びにニッケル基耐食耐熱超合金のハスティロイ XRを、使用条件により使い分けている。
各機器の使用条件は、次のように大別している。

(1) 低温ヘリウムと外気との境界を形成する箇所

通常運転時には最高約400°Cで、約40kg/cm²Gの圧力が内圧として作用している。事故時においては、金属温度は約550°Cまで上昇する可能性がある。

(2) 1次ヘリウムと2次ヘリウムの境界を形成する箇所

通常運転時に最高900°C以上の高温となる。事故時において、約950°Cまで上昇する可能性がある。

(3) 1次ヘリウムと加圧水の境界を形成する箇所

通常運転時には最高約300°Cであるが、事故時において、約650°Cまで上昇する可能性がある。

(1)の使用条件に該当する箇所には、原子炉圧力容器、中間熱交換器の胴、1次ヘリウム循環機のケーシング等があり、これらには、2 1/4 Cr - 1 Mo鋼NT材 - HTTR仕様材を使用する。2 1/4 Cr - 1 Mo鋼NT材 - HTTR仕様材は、高温工学試験研究炉の耐用期間中最低使用温度を十分低く保つために、中性子照射脆化及び熱時効脆化による無延性遷移温度の上昇を抑制できるよう、文献(4), (5)等を参考にし、原安協での検討結果⁽²⁾を踏まえて、Si, P等の不純物含有量をJISに定める2 1/4 Cr - 1 Mo鋼NT材の化学成分範囲内で次に示すように制限したものである。

$$J = (Si + Mn)(P + Sn) \times 10^4 \leq 100$$

Si, Mn, P, Sn : wt %

$$\bar{X} = (10P + 5Sb + 4Sn + As)/100 \leq 10$$

P, Sb, Sn, As : ppm

(2)の使用条件に該当する箇所には、中間熱交換器の伝熱管、高温ヘッダ等があり、これらには、ハスティロイ XRを使用する。ハスティロイ XRは、高温強度が高く耐食性に優れたハスティロイ Xを基に、原子炉冷却材（ヘリウムガス）中に含まれるH₂O, CO, CO₂等の不純物による腐食を抑制するため、次に示すように最適化したものである⁽⁶⁾。

① Mn含有量増

ち密な酸化膜を形成するように、Mn含有量をハスティロイ Xの仕様内で増す。

② Si含有量の適量化

素地に密着した酸化膜を形成するように、Si含有量をハスティロイ Xの仕様内で制限する。

③ Al, Ti 及び Co 含有量減

粒界侵食を抑制するため、Al 及び Ti の含有量をハステロイ X の仕様内で減らし、更に、放射化を抑制するため、Co 含有量を減らす。

ハステロイ XR の化学成分仕様を、ハステロイ X⁽⁷⁾と比較して Table 2.1.1 に示す。

更に、(3)の使用条件に該当する箇所には、1 次加圧水冷却器及び補助冷却器の伝熱管があり、これらには、高温での特性が明確で、約 650°C までの使用実績が豊富なオーステナイト系ステンレス鋼を使用する。

以上、使用材料とその使用条件をまとめて Table 2.1.2 に示す。

Table 2.1.1 Specifications for Chemical Compositions of Hastelloy XR and X.

Material	Range	Chemical Compositions (wt%)														
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo	W	Fe	Ni	B	Al	Ti	Cu
Hastelloy XR	max	0.15	1.00	0.50	0.040	0.030	23.00	2.50	10.00	1.00	20.00	Re-mainder	0.010	0.05	0.03	0.50
	min	0.05	0.75	0.25	-	-	20.50	-	8.00	0.20	17.00	Re-mainder	-	-	-	-
Hastelloy X	max	0.15	1.00	1.00	0.040	0.030	23.00	2.50	10.00	1.00	20.00	Re-mainder	0.010	0.50	0.15	0.50
	min	0.05	-	-	-	-	20.50	0.50	8.00	0.20	17.00	Re-mainder	-	-	-	-

Table 2.1.2 Materials and Service Conditions of Class 1
Components of the HTTR

Material		Component		Service Conditions	
Material	Product Form	Classification	Components	Design Temperature(°C)	Design Pressure(MPa)
2 1/4Cr-1Mo Steel-NT material-HTTR spec.	Plate and Forging	HTTR Class 1 Vessel	Reactor Pressure Vessel	440	4.8 (48 kg/cm ² G)
			Shells (Outer Shells) of IHX, PPWC and AHX	430	4.8 (48 kg/cm ² G)
			Tube sheets of PPWC and AHX	262	4.8 (48 kg/cm ² G)
	Plate, Smls. Pipe and Forging	HTTR Class 1 Piping	Outer Pipings of Co-Axial Double-Wall Pipings and Single-Wall Pipings	430	4.8 (48 kg/cm ² G)
		HTTR Class 1 Circulator	Casings of Primary and Auxiliary Helium Circulators	430	4.8 (48 kg/cm ² G)
	Forging	HTTR Class 1 Valve	Bodies of Check Valves, Globe Valves, etc.	430	4.8 (48 kg/cm ² G)
Hastelloy XR	Smls. Tube, Plate and Forging	HTTR Class 1 Vessel	IHX	Heat Transfer Tubes	0.29(3 kg/cm ²)
				Hot Header	0.29(3 kg/cm ²)
				Cold Header	0.29(3 kg/cm ²)
Austenitic Stainless Steels (SUS321TB and SUS316)	Smls. Tube	HTTR Class 1 Vessel	Heat Transfer Tubes	PPWC	4.8 (48 kg/cm ² G)
				AHX	4.8 (48 kg/cm ² G)

Notations: IHX ; Intermediate Heat Exchanger
PPWC; Primary Pressurized Water Cooler
AHX ; Auxiliary Heat Exchanger

3. 材料強度基準等の作成方法

2 1/4 Cr-1 Mo鋼NT材-HTTR仕様材、オーステナイト系ステンレス鋼（SUS 321TB 及び SUS 316）及びハスティロイ XR の各々について、まず、どのような基本的考え方で材料強度基準等を作成すれば良いかを定める。次に、この基本的考え方に基づき、材料特性を十分に検討して、具体的な作成方法を定める。

3.1 作成の基本的考え方

高温構造設計方針の材料強度基準等は、高温構造設計方針が「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」⁽⁸⁾（以下、「FBR 方針」と称する。）に基づいて作成していること、並びに、高温構造設計方針が対象とする材料のうち 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT 材-HTTR 仕様材及びオーステナイト系ステンレス鋼（SUS 321TB 及び SUS 316）については「高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準等」⁽⁹⁾（以下、「FBR 方針材料強度基準等」と称する。）に同種の材料の材料強度基準等が定められていることを考慮して、各材料について以下の方針により作成する。

(1) 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT 材-HTTR 仕様材

次の項目について検討を行ない、材料強度基準等を定める。

① FBR 方針材料強度基準等の適用性

高温工学試験研究炉第1種機器には不純物含有量をJISの規定内で低く制限している2 1/4 Cr-1 Mo鋼NT材-HTTR仕様材を使用するが、FBR 方針材料強度基準等は、JISによる2 1/4 Cr-1 Mo鋼NT材に対する材料強度基準等を定めている。2 1/4 Cr-1 Mo鋼NT材-HTTR 仕様材の強度データは、2 1/4 Cr-1 Mo鋼NT材の強度データの範囲内にあると考えられるが、その平均強度は両材間で異なる可能性がある。材料強度基準のなかには、設計疲労曲線のように平均強度に安全係数を乗じて値を定めているものもあるので、FBR 方針材料強度基準等を2 1/4 Cr-1 Mo鋼NT材-HTTR 仕様材の材料強度基準等としてそのまま適用できるか検討する必要がある。

② ヘリウム環境効果及び中性子照射効果

本材料は、原子炉冷却材（ヘリウムガス）に接して使用されること、並びに、原子炉圧力容器材として使用されることから、ヘリウム環境効果及び中性子照射効果について検討する必要がある。

(2) オーステナイト系ステンレス鋼（SUS 321TB 及び SUS 316）

高温工学試験研究炉においては、オーステナイト系ステンレス鋼の化学成分、熱処理条件等は高速原型炉「もんじゅ」の場合と特に変わらないので、FBR 方針材料強度基準等の値を適用する。本材料は、原子炉冷却材（ヘリウムガス）に接して使用されるので、ヘリウム環境効果について検討し、必要に応じてヘリウム環境効果の評価規定を定める。

(3) ハステロイ XR

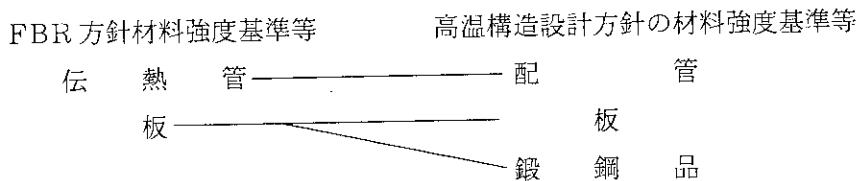
ハステロイ XRは、FBR方針材料強度基準等に含まれていないが、金属組織はオーステナイト系であることから、その材料特性はオーステナイト系ステンレス鋼の材料特性と同様な傾向を示すことが予想される。そこで、材料特性を比較して、オーステナイト系ステンレス鋼に対するFBR方針材料強度基準等の作成方法を参考とすることができるか検討し、材料試験データに基づき、材料強度基準等を定めることとする。本材料は、原子炉冷却材（ヘリウムガス）あるいは中間熱交換器の2次側のヘリウムガスに接して使用されるので、ヘリウム環境効果について検討し、必要に応じてヘリウム環境効果の評価規定を定める。

3.2 2 1/4 Cr-1 Mo鋼 NT材-HTTR仕様材

FBR方針材料強度基準等の適用性並びにヘリウム環境効果及び中性子照射効果の評価について検討のうえ、材料強度基準等の作成方法を定める。

3.2.1 FBR方針材料強度基準等の適用性

平均強度から定めている材料強度基準としては、設計クリープ破断応力強さ及び設計疲労線図(許容ひずみ範囲)が代表的である。2 1/4 Cr-1 Mo鋼 NT材-HTTR仕様材の大気中におけるクリープ破断強度及び疲労強度のデータを、FBR方針材料強度基準等を定める基になったそれぞれの強度データ^{(10), (11)}(以下、「FBR材料の強度データ」という。)と比較すると、Figs. 3.2.1, 3.2.2に示すようになる。これらの図に示すように、2 1/4 Cr-1 Mo鋼 NT材-HTTR仕様材の平均強度は、FBR材料の強度データの平均値と同等あるいはそれ以上であるといえる。従って、2 1/4 Cr-1 Mo鋼 NT材-HTTR仕様材の材料強度基準等は、FBR方針材料強度基準等の2 1/4 Cr-1 Mo鋼 NT材に対する値を適用してよい。なお、高温工学試験研究炉では2 1/4 Cr-1 Mo鋼 NT材-HTTR仕様材の使用製品形態は配管、板及び鍛鋼品(STPA 24-HTTR仕様材、SCMV 4-2-HTTR仕様材及びSFVA F 22B-HTTR仕様材)であるが、FBR方針材料強度基準等では伝熱管と板(STBA 24及びSCMV 4-2)について定めている。製品形態による強度の差異については、伝熱管と配管とは異なること。鍛鋼品については厚さが35cm程度までであれば板と異なることが知られている。そこで、製品形態については、FBR方針材料強度基準等を次のとおり適用する。



3.2.2 ヘリウム環境効果及び中性子照射効果

ヘリウムガスは不活性であるので、純度100%であれば真空と同様な環境効果を示すと予想される。しかしながら、原子炉冷却材のヘリウム中には、炉心の黒鉛ブロック及び配管の断熱材中に含まれるH₂Oと黒鉛との反応によって生成されるH₂, CO, CH₄, CO₂等の不純物が微量ながら含まれる。このため、高温では、原子炉冷却材による環境効果は、真空の場合とは異なることが予想される。このような環境効果としては、強度への影響と酸化腐食が考えられる。以下に、この検討結果を示す。

まず、強度への影響については、一般に環境効果が最も顕著に現われる疲労強度の場合でも、Fig. 3.2.3に示すように、真空中とほとんど変わらない⁽¹²⁾。また、原子炉冷却材を模擬したヘリウム中の不純物による内部酸化は、550°Cで5000h後において酸化の深さが高々6μmである⁽¹³⁾。この値は、2 1/4 Cr-1 Mo鋼の空気接面に想定するくされ代0.4mm⁽¹⁴⁾に比べて非常に小さい。従って、高温工学試験研究炉の使用条件内(通常時最高約400°C)では空気中での試験データに

基づいて定めた FBR 方針材料強度基準等を適用することは保守的な取扱いとなる。また、ヘリウムガス接面のくされ代は考慮しなくてよいといえる。

中性子照射効果に関しては、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼NT材-HTTR仕様材は、Fig. 3.2.4⁽¹⁵⁾に示すように、金属温度が 450°C 以下でフルエンスが約 10^{19}n/cm^2 までは中性子照射による強度への影響は無視できる。

3.2.3 材料強度基準等の作成方法

以上の検討から、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼NT材-HTTR仕様材及びJISによる $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼NT材に対する材料強度基準等は、同一としてよく、従って、FBR 方針材料強度基準等の値を適用する。また、高温工学試験研究炉のヘリウム環境及び中性子照射下においては、大気中で非照射材から取得した試験データより定めた FBR 方針材料強度基準等の値を特に補正することなく適用し、更に、ヘリウムガス接面のくされ代はとらない。

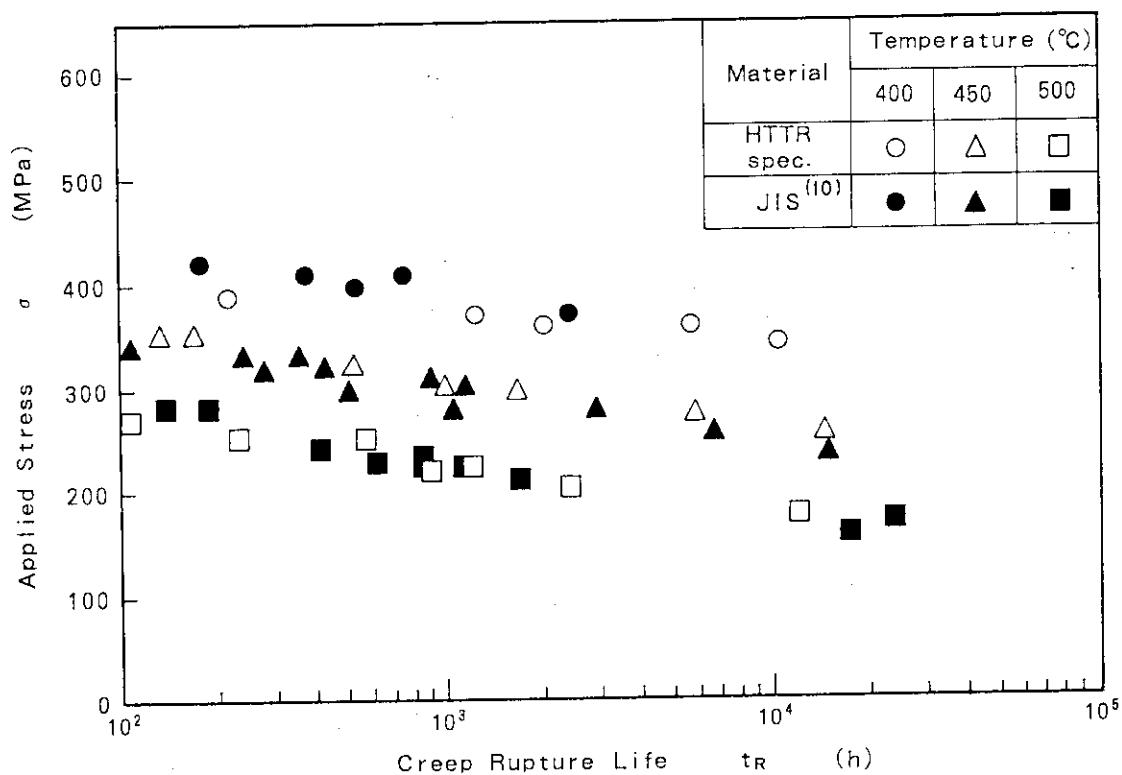


Fig. 3.2.1 Creep Strength of $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ Steel-NT-HTTR Spec.

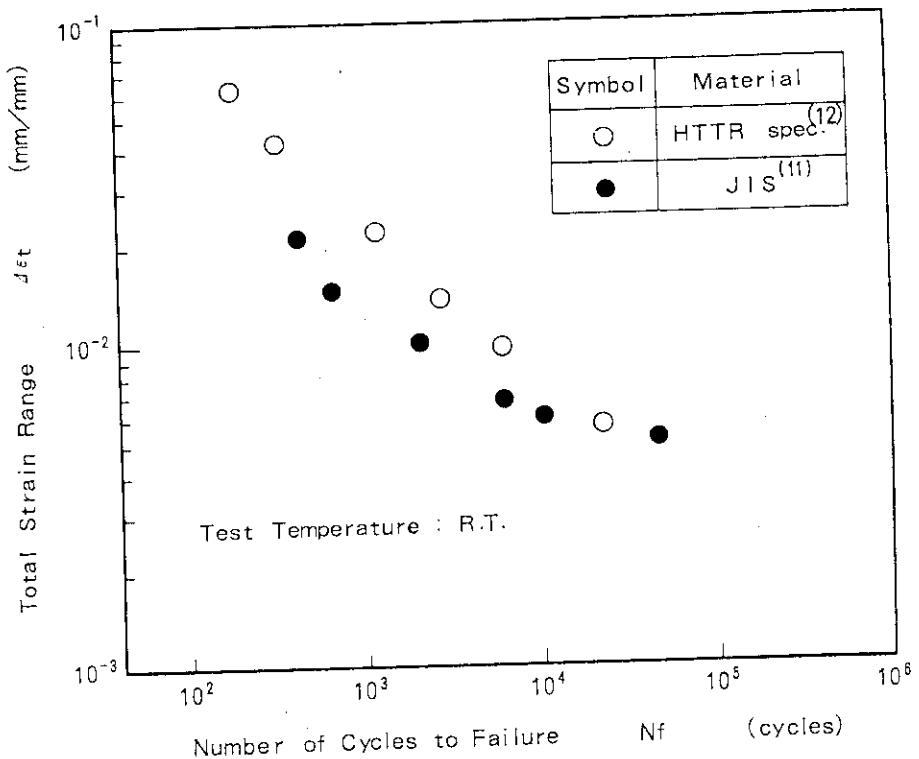


Fig. 3.2.2 Fatigue Strength of 2 1/4Cr-1Mo Steel-NT-HTTR Spec.

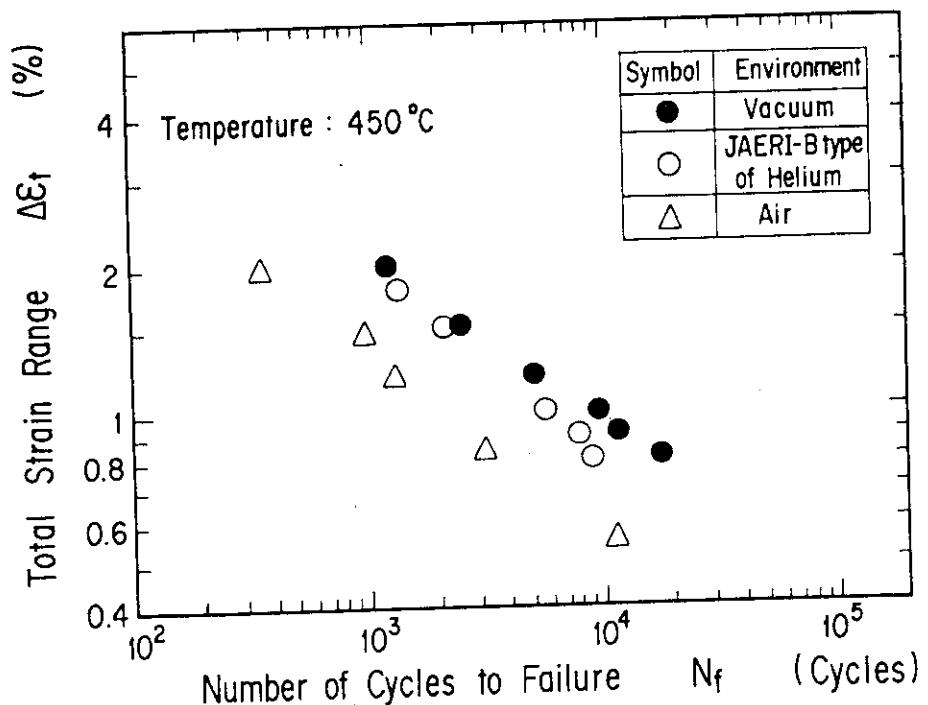
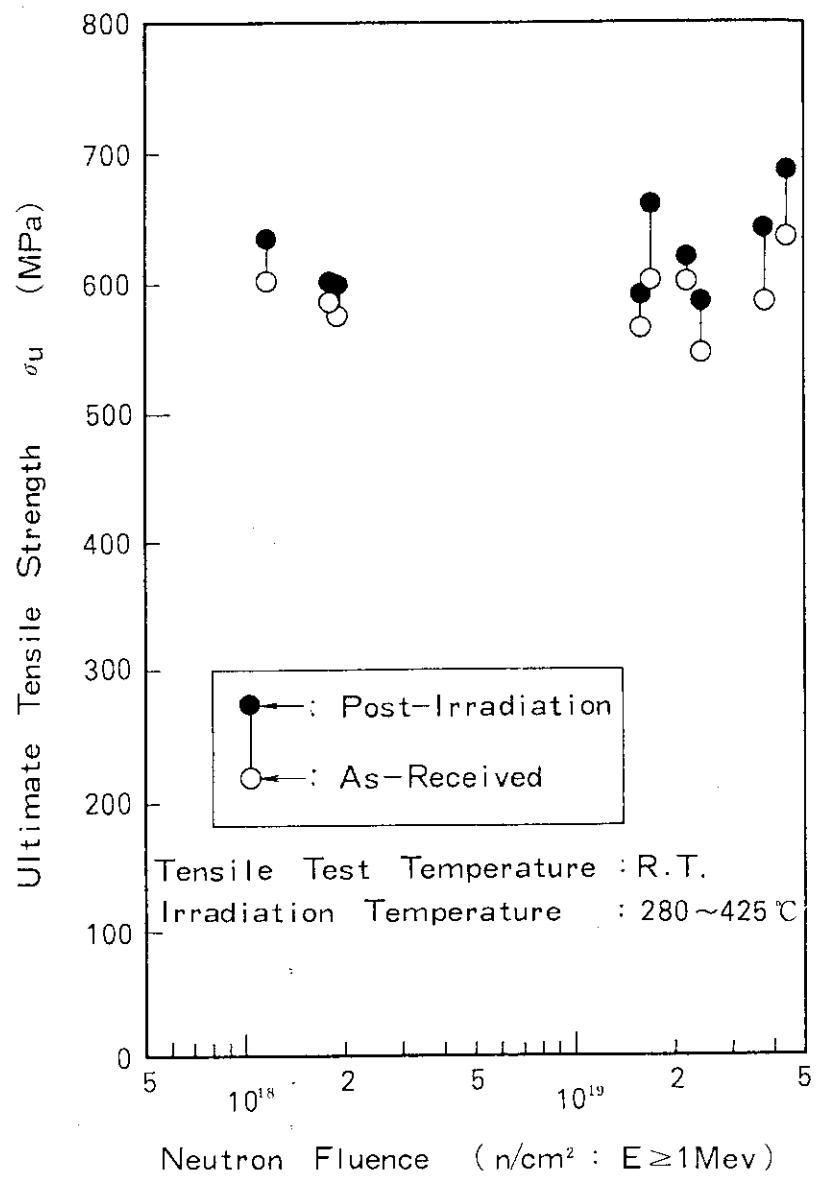


Fig. 3.2.3 Environmental Effect on Fatigue Strength for 2 1/4Cr-1Mo Steel NT Material-HTTR Spec.⁽¹²⁾



3.3 オーステナイト系ステンレス鋼（SUS 321TB 及び SUS 316）

SUS316 の場合、650°Cで10000h、高温ガス炉の原子炉冷却材を模擬したヘリウムガスにさらされたとしても、粒界酸化は全くなく、表面酸化膜の厚さも $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度である⁽¹³⁾。SUS 321TB も 650°C 以下であれば SUS 316 と同様に粒界酸化、表面酸化とともに小さいと考えられる。従って、オーステナイト系ステンレス鋼に対しては、FBR 方針材料強度基準等の SUS 321TB 及び SUS 316 に対する値を特に補正することなく適用し、くされ代は考慮しなくてよい。

3.4 ハステロイ XR

ハステロイ XR の材料強度基準等は、引張試験、クリープ試験等の材料試験データに基づき材料特性を十分に検討し、FBR 方針材料強度基準等の策定方法を参考にすることができるかを検討したうえで、構造等の技術基準の各種材料強度基準等の策定方法と整合した方法で定める。

3.4.1 材料特性

本項では、ハステロイ XR の材料特性がどのような特徴を有するかを、オーステナイト系ステンレス鋼及び 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT 材と比較して検討する。

3.4.1.1 引張特性

ハステロイ XR は応力-ひずみ曲線が高温で特徴的な傾向を示すこと、並びに、材料強度基準の作成上降伏強度（0.2% 耐力）に対する安全係数は材料により（具体的には、降伏比及び引張破断延性の高低により）異なることから、以下について検討する。

(1) 応力-ひずみ曲線

(2) 降伏比（極限引張強さ / 0.2% 耐力）及び破断延性

(1) 応力-ひずみ曲線

ハステロイ XR の応力-ひずみ曲線は、室温から約 800°Cまでの低・中温域においては Fig. 3.4.1 に示すように滑らかに加工硬化しているが、約 850°Cより高温においては、JIS⁽¹⁶⁾に従った引張試験では、後述のように、粘性（クリープ）効果が無視できないため、顕著な加工硬化を示さなくなる。更に、粘性効果の一現象である動的再結晶が生じ、Fig. 3.4.2 に示すように応力降下が生じたり、波状の曲線となる。動的再結晶による波状の応力-ひずみ曲線に対しては、応力-ひずみ曲線を記述する数式として従来提案されているものは、加工硬化を前提としており、適用することができない。この動的再結晶は、一般に、熱間加工のときのような、高温で、かつ、比較的高速の条件下で顕著に生ずる。

応力-ひずみ曲線から求められる 0.2% 耐力及び極限引張強さは、粘性効果の影響を受けると、Fig. 3.4.3 に示すようなひずみ速度依存性を有すると考えられる。ハステロイ XR についてひずみ速度依存性を調べると、Fig. 3.4.4 に示すようになり、粘性効果の影響を受けていることは明らかである。この場合、JIS に従った引張試験から得られる極限引張強さ等の値は真の値よりも小さくなる。高温になるほど粘性効果が著しくなるため、この低下度合いは、高温側でより大きくなる。この結果、高温側で、極限引張強さ等から求まる弾・塑性の許容応力を過度に低く算出することになり、構造設計上合理的でない。弾・塑性の許容応力は、高温構造設計方針において破損モードとして短期荷重による延性破壊と長期荷重によるクリープ破壊とを分けていること、並びに、材料の挙動も弾・塑性とクリープとを分けていることから必要となる。このように分けている理由は、地震荷重等の高速のひずみ速度で作用する衝撃荷重による構造物の挙動は高温においてもクリープが無視でき弾塑性挙動となるので、これらの衝撃荷重に対しては、延性破壊等の時間に依存しない破損を防止する必要があるからである。

しかし、Fig. 3.4.3 に示すように、粘性効果はあるひずみ速度以上では無視でき、また、動的再結晶はひずみ速度がある程度以上高速であれば抑制され、この場合には加工硬化を示すこ

とが知られている。

以上を考慮して検討した結果、ひずみ速度が、JISより高速であるが衝撃荷重のひずみ速度程度である約100%/minであれば、Fig. 3.4.4から明らかなように0.2%耐力及び極限引張強さはひずみ速度に依存しなくなり、即ち、粘性効果が無視できるようになり、また、応力-ひずみ曲線は、Fig. 3.4.5に示すように、波状の曲線とはならず滑らかに加工硬化することがわかった。高温構造設計方針並びに「黒鉛減速ヘリウム冷却型原子炉施設に関する構造等の技術基準」⁽¹⁷⁾（以下、「構造等の技術基準」と称する。）の考え方を合理的に適用できることから、800°Cを超える場合には、引張試験は100%/minのひずみ速度で実施し、このデータから材料強度基準等を作成することとする。

(2) 降伏比及び破断延性

最大許容応力強さS_o及び設計応力強さS_mの作成上、降伏強度データから定める設計降伏点S_yに対する安全係数は、材料が、降伏比が十分に大きく延性も十分に高いオーステナイト系であるか否かにより異なる。

ハスティロイXRの降伏比及び破断延性^{(18),(19)}は、Figs. 3.4.6, 3.4.7に各々示すように、オーステナイト系ステンレス鋼と同様に高い値を示す。両図では、オーステナイト系ステンレス鋼のSUS321HTB⁽²⁰⁾、フェライト系の2 1/4 Cr-1 Mo鋼NT材-HTTR仕様材⁽²¹⁾をハスティロイXRと比較している。SUS321HTBは、SUS321TBの炭素含有量を若干高めたものである。従って、ハスティロイXRの最大許容応力強さS_o及び設計応力強さS_mを定めるときの設計降伏点S_yに対する安全係数は、オーステナイト系ステンレス鋼に対する安全係数と同じ値とする。

3.4.1.2 クリープ特性

FBR方針材料強度基準等では、クリープ特性に関する材料強度基準を定めるための安全係数は引張特性のように材料により異なるということはないが、ハスティロイXRに対してもこれらの安全係数等が適用できるか否かは検討を要する。クリープ特性が関連する個々の材料強度基準等については第3.4.2項で検討することとし、ここでは、高温工学試験研究炉のハスティロイXRを使用する箇所の構造健全性を決定している材料強度はクリープ破断強度であることから、クリープ破断に関する以下の特性について検討する。

(1) クリープ破断強度

(2) クリープ破断延性

(1) クリープ破断強度

クリープ破断強度については、後述するように、これを数式で記述する必要があるので温度及び応力への依存性を明らかにしておく必要があり、また、ハスティロイXRは原子炉冷却材等のヘリウムガスに接して使用されるのでヘリウム環境効果を明らかにしておく必要がある。

まず、クリープ破断強度の温度・応力依存性について、Fig. 3.4.8は、国内で実施したクリープ破断試験のデータ^{(22),(23),(24)}を800°Cから1050°Cまでについてプロットしたものである。1000°C以下では、負荷応力とクリープ破断寿命との関係は両対数紙上ではほぼ直線で表わされ、この直線の傾きは温度によってあまり変わらない。従って、ハスティロイXRのクリープ破断強度は、1000°Cまでは安定していると考えられる。

次に、クリープ破断強度へのヘリウム環境効果について、Fig. 3.4.9は、高温工学試験研究炉の原子炉冷却材によるハスティロイ XRへの環境効果を模擬している原研B型ヘリウム中⁽²⁴⁾でのクリープ破断強度データ^{(22),(23)}と大気中でのデータ^{(22),(24)}とを比較したものである。本図から明らかなように、原研B型ヘリウム中での強度は大気中での強度と同等であるので、材料強度基準等の作成には、原研B型ヘリウム中でのデータ及び大気中でのデータとともに用いることとする。

(2) クリープ破断延性

クリープ破断延性について、Fig. 3.4.10は、ハスティロイ XR^{(22),(23),(24)}とSUS 304⁽²⁶⁾とを比較して示したものである。ハスティロイ XRのクリープ破断延性は、SUS 304と同様な傾向を示しており、クリープ破断時間が約千時間までの短時間側、即ち、高負荷応力側では、破断時間が長くなるに従い低下しているが、長時間側ではあまり低下しない。

3.4.1.3 疲労特性

疲労特性に関しては、基本的な疲労強度特性に加え、繰返し応力特性及び環境効果について検討する。繰返し応力特性に着目するのは、高温構造設計方針では疲労損傷評価に用いる繰返し応力-ひずみ曲線には等時応力-ひずみ曲線の $t = 0\text{ h}$ での曲線、即ち、引張試験から求まる応力-ひずみ曲線を用いており、極端に繰返し軟化する場合には疲労損傷を非安全側に評価する恐れがあるからである。環境効果に着目るのは、疲労強度が環境（雰囲気）に敏感であるからである。

(1) 疲労強度特性

疲労強度は、引張特性、とりわけ極限引張強さと破断延性に密接に関係しており、この相関関係式としては、次式で表わす、S.S. Mansonにより考案されたユニバーサルスロープ法⁽²⁷⁾が試験データと比較的良く一致することが知られている⁽²⁸⁾。

$$\Delta \varepsilon_t = \frac{3.5 \sigma_u}{E} N_f^{-0.12} + \varepsilon_f^{0.6} N_f^{-0.6} \quad (3.4.1)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_t$ ：全ひずみ範囲

N_f ：破損サイクル数

σ_u ：極限引張強さ

E ：綫弾性係数

ε_f ： $\ln A_0/A_f = \ln 1/(1-RA)$ ：破断絞り RAから求まる真破断延性

Fig. 3.4.11は、ハスティロイ XRの室温における疲労強度データとユニバーサルスロープ法による予測値との比較を示したものである。予測値は疲労強度データと比較的良く一致していることから、低温におけるハスティロイ XRの疲労強度は、一般の鉄鋼材料等と同様に、ユニバーサルスロープ法によって概略予想できることがわかる。

次に、Fig. 3.4.12は、疲労強度の温度依存性を示す。クリープが無視できる低温においても温度が高くなるに従い疲労強度が低下しているが、これは、Fig. 3.4.21に示すように、極限引張強さが温度が高くなるに従い低下していることによる。

(2) 繰返し応力特性

Figs. 3.4.13～3.4.15は、室温、800°C及び900°Cにおける定ひずみ範囲疲労試験中の応力範囲の変化を示したものである。これらの図から明らかのように、約800°C以下ではオーステナイト系ステンレス鋼と同様に繰返し硬化しており、特に低温においては硬化が一旦飽和した後に若干軟化して破損に至っている。この傾向は、SUS 316及びSUS 304と類似している⁽²⁸⁾。これに対し、約850°C以上の高温では応力範囲はあまり変わらない。高温において応力範囲が変わらないのは、このような高温ではクリープが顕著に生じるため、ひずみ速度が10⁻³/secであってもクリープが繰返し応力特性を決定しているからである。より高速なひずみ速度で疲労試験を行なえば繰返し硬化が観察されると予想される。従って、ハスティロイ XRの繰返し応力特性は、オーステナイト系ステンレス鋼と同様であるといえる。

(3) 環境効果

ハスティロイ XRの原研B型ヘリウム中での強度は大気中よりも若干高い⁽²⁹⁾。大気中での疲労試験はヘリウム中よりも容易であることを考慮し、材料強度基準作成のためのデータは、大気中でのデータを基準とし、ヘリウム中でのデータを必要に応じ援用することとする。

3.4.1.4 クリープ疲労相互作用

高温での疲労強度は、保持時間を長くするほどあるいはひずみ速度を遅くするほどクリープの影響を受け、低下する。ハスティロイ XRについて、このような疲労とクリープとの相互作用を明らかにするため、試験データ⁽³⁰⁾を破損までのサイクル数N_fと破損までの時間t_fとの関係として整理した結果をFig. 3.4.16に示す。この図から、保持時間効果とひずみ速度効果を比較して把握することができる。Figs. 3.4.17～3.4.19には、比較としてSUS 304⁽²⁸⁾、SUS 316⁽²⁸⁾及び2 1/4 Cr-1 Mo鋼NT材⁽¹¹⁾について同様に整理した結果を示す。これらの図で示すt_fとN_fとの関係は、前述した全ひずみ範囲Δε_tとN_fの関係とは、次に示すように密接に関連している。Δε_tとN_fの関係を次式のべき乗則で表わすと、

$$\Delta \varepsilon_t = CN_f^n \quad (3.4.2)$$

保持時間無し、ひずみ速度一定の条件下では、

$$t_f = 2 \frac{\Delta \varepsilon_t}{\dot{\varepsilon}} N_f \quad (3.4.3)$$

となることより、t_fとN_fとの関係は

$$t_f = 2 \frac{C}{\dot{\varepsilon}} N_f^{n+1} \quad (3.4.4)$$

で表わされる。低温において低サイクル側でのΔε_tとN_fとの関係は、ユニバーサルスロープ法が示すように、n = -0.6として近似することができる。このとき、n + 1 = 0.4となる。Figs. 3.4.16～3.4.19には、勾配0.4を参考として記入してある。

これらの図の比較から、ハスティロイ XRは、保持時間効果に関しては、オーステナイト系ステンレス鋼（SUS 304等）と同様に引張保持の場合が最も破損サイクル数の低下が大きいことがわかる。ただし、このサイクル数の低下には下限があり、ある引張保持時間以上では変わらなくなる。

る（ハスティロイ XR の場合、Fig. 3.4.16 の条件では約 10 分、SUS 304 の場合、Fig. 3.4.17 の条件では約 600 分であり、低下の下限値は約 1/10）。

ひずみ速度効果に関しては、ハスティロイ XR は、900°Cにおいて、Fig. 3.4.19 と同様な破損サイクル数の低下傾向を示している。この強度低下は、ひずみ速度を遅くしていくとより大きくなっている。図に示されている試験条件では低下の下限は認められていない。このような傾向は SUS 304、SUS 316 及び 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT 材でも観察されている。

このように、ハスティロイ XR のクリープ疲労特性は、基本的には、オーステナイト系ステンレス鋼と同様であるといえる。

3.4.1.5 検討結果

以上から、ハスティロイ XR の材料特性は、基本的には、オーステナイト系ステンレス鋼と同様な傾向を有しているといえる。

ただし、引張特性に関しては、超高温では JIS に従った引張試験では、粘性効果を無視できず、また、粘性効果の一現象として動的再結晶が生じ、応力-ひずみ曲線に応力降下が生じたり、あるいは波状となるので、高温構造設計方針と整合させるためには新たな考え方が必要となる。検討の結果、ひずみ速度がより高速の 100%/min では動的再結晶が抑制されほぼ純粋な弾塑性特性となり、この場合には、高温構造設計方針等を合理的に適用できることから、800°Cを超える場合の引張特性に関する材料強度基準は、ひずみ速度を 100%/min とした引張試験から得られるデータより定めることとした。

3.4.2 材料強度基準等

ハスティロイ XR の材料強度基準等は、前項の検討結果に基づき、オーステナイト系ステンレス鋼に対する材料強度基準等の作成方法を参考にし、構造等の技術基準に定める関連材料強度基準等の作成方法と整合した方法で定める。

以下に、各材料強度基準等の作成方法を示す。

3.4.2.1 最大許容応力強さ S_u

各温度 T (°C)における最大許容応力強さ S_u (kg/mm²) は、次に掲げる値のうち最小のものとする。

- (1) 室温 (RT) での最小引張強さの 0.25 倍の値、0.25 S_u (RT)
- (2) 各温度 T での設計引張強さの 0.25 倍の値、0.25 S_u (T)
- (3) 室温での最小降伏点の 0.625 倍の値、0.625 S_y (RT)
- (4) 各温度 T での設計降伏点の 0.9 倍の値、0.9 S_y (T)
- (5) 1000 時間に 0.01% のクリープを生ずる応力の平均値、 $\bar{\sigma} \left(\frac{0.01\%}{1000 \text{ h}} \right)$
- (6) 1×10^5 時間でクリープ破断を生ずる応力又はこれに相当する応力の最小値の 0.8 倍の値、 $0.8 S_R (t_{R,min} = 1 \times 10^5 \text{ h}, T)$
- (7) 1×10^5 時間でクリープ破断を生ずる応力又はこれに相当する応力の平均値の 0.6 倍の値、 $0.6 \sigma_R (t_R = 1 \times 10^5 \text{ h}, T)$

この方法は、構造等の技術基準別表第 6 「鉄鋼材料の各温度における許容引張応力」備考 7 の

オーステナイト系材料及び高ニッケル合金に適用する方法であり、FBR 方針材料強度基準等のオーステナイト系ステンレス鋼に適用している方法である。

上記のうち、 S_u 、 S_y 、並びに S_R 及び $\bar{\sigma}_R$ の策定方法は、各々本項の 3.4.2.6、3.4.2.5 及び 3.4.2.4 に示す。

(5)に示す 1000 時間に 0.01% のクリープを生ずる応力の平均値は、FBR 方針材料強度基準等と同じく最小クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{min}$ が $0.01\%/1000\text{ h}$ 、即ち $10^{-5}\%/h$ となる応力又はこれに相当する応力の平均値とする。

最小クリープひずみ速度は、3.4.2.5 に示すクリープ破断時間の算出式に準じて、Orr - Sherry - Dorn 法により下式から求める。

$$\log_{10} \dot{\epsilon}_{min} + \frac{\bar{Q}}{R \cdot T_k} \cdot \log_{10} e = \sum_{i=0}^2 \bar{a}_i (\log_{10} \bar{\sigma})^i \quad (3.4.5)$$

$\dot{\epsilon}_{min}$: 平均最小クリープひずみ速度 (%/h)

$\bar{\sigma}$: 平均応力 (kg/mm²)

$\bar{a}_0 = 14.766$

$\bar{a}_1 = 3.490$

$\bar{a}_2 = 2.131$

$\bar{Q}/R = 2.288 \times 10^4$

$\sigma < 0.5 \text{ kg/mm}^2$ では $\sigma = 0.5 \text{ kg/mm}^2$ での $\dot{\epsilon}_{min}$ 値及びその勾配により直線外挿している。なお、設計降伏点に対しては安全裕度をオーステナイト系ステンレス鋼と同様に 0.9 としているのは、3.4.1.1 で検討したとおり、ハステロイ XR の降伏比及び破断延性がオーステナイト系ステンレス鋼と同様に十分高いからである。

3.4.2.2 設計応力強さ S_m

各温度 T (°C)における設計応力強さ S_m は、次に掲げる値のうち最小のものとする。

- ① 室温での最小引張強さの 3 分の 1 の値、 $1/3 S_u(RT)$
- ② 各温度 T での設計引張強さの 3 分の 1 の値、 $1/3 S_u(T)$
- ③ 室温での最小降伏点の 3 分の 2 の値、 $2/3 S_y(RT)$
- ④ 各温度 T での設計降伏点の 0.9 倍の値、 $0.9 S_y(T)$

この方法は、構造等の技術基準別表第 2 「材料の各温度における設計応力強さ」備考 4 のオーステナイト系材料及び高ニッケル合金に適用している方法である。

3.4.2.3 設計応力強さ S_t

設計応力強さ S_t は、FBR 方針材料強度基準等に定める方法と同じく、当該温度、各時間において次に掲げる値のうち最小のものとする。

- (1) 当該温度、各時間での設計クリープ破断応力強さ S_R の 2/3 倍の値
- (2) 当該温度、各時間での第 3 期クリープを開始する応力の最小値 $S_{3,min}$ の 0.8 倍の値
- (3) 当該温度、各時間での 1.0% のひずみを生じる応力の最小値 $S_{1\%, min}$

上記(2)の $S_{3,min}$ 及び(3)の $S_{1\%, min}$ の策定方法を以下に示す。

- ① 第 3 期クリープを開始する応力の最小値 $S_{3,min}$

第3期クリープを開始する時間 t_3 データに関しては、オーステナイト系ステンレス鋼の場合、 t_3/t_R はほぼ一定の値となる。従って、FBR方針材料強度基準等では $t_3/t_R = \alpha_3$ で一定として、 t_R 式より t_3 を求めている⁽¹⁰⁾。

一方、ハスティロイ XR の場合、低応力になるほど t_3/t_R は大きくなり、高温になるほど小さくなる傾向がある。従って、ハスティロイ XR に対しては、FBR方針材料強度基準等の方法を適用するのは適切でない。ここで、 t_3 は、国内で実施したクリープ試験から得られたクリープ曲線データ^{(22), (23), (24)} より著者らが求めたものである。 t_3 の温度・応力依存性を詳細に検討すると、Fig. 3.4.20 に示すようになり、 t_R には比例しないが、 t_R と同様な温度・応力依存性を有する。そこで、 t_R と同じく、適切な温度・時間パラメータ (TTP) を選定して、これによりデータ整理するのが適切といえる。550°C ~ 1000°C の温度範囲で長時間破断のデータが集中的に取得されており、これらのデータより t_3 の温度・応力依存性を定める。

② 1%全ひずみを生ずる応力の最小値 $S_{1\%, \min}$

1%全ひずみを生ずる時間 $t_{1\%}$ は、クリープ破断時間 t_R と同様な温度・応力依存性を示すことから、TTP 法により求める。そして、 $t_{1\%}$ の最小値 $t_{1\%, \min}$ は $t_{1\%}$ データが対数正規分布するとしてその予測区間の 95% 下限値を十分下回る値として定める。

3.4.2.4 設計降伏点 S_y

各温度 T (°C)における設計降伏点 S_y (kg/mm²) は、構造等の技術基準別表第 9 「材料の各温度における設計降伏点」備考 4 の方法に準じて求めることとし、ハスティロイ XR の化学成分等の仕様は Co 含有量を除きハスティロイ X の仕様に含まれることから、下式により求める。

$$S_y(T) = \alpha_{y, \min} \cdot \overline{\sigma}_y(T) \quad (3.4.6)$$

$S_y(T)$: 温度 T における設計降伏点

$\overline{\sigma}_y(T)$: 温度 T における平均 0.2% 耐力

$$\alpha_{y, \min} = \min(0.885, \alpha_{RT})$$

0.885 : 構造上の技術基準に定めるステンレス鋼及び高ニッケル合金に対する統計上の信頼係数

α_{RT} : 室温における ASME B&PV Code Section III⁽³¹⁾ のハスティロイ X の 1/1.1 倍の値とハスティロイ XR の $\overline{\sigma}_y$ との比

ただし、高温側の耐力の値が低温側の耐力の値を超える場合は、低温側の極小値を超えないものとする。

Fig. 3.4.21 に、試験データと設計降伏点との比較を示す。なお、3.4.1.1 で述べたとおり、引張試験は、800°C 以下では JIS に従って行い、800°C を超える高温域では 100%/min の引張速度で行なっている。

なお、高温工学試験研究炉において、通常起動・停止時や原子炉スクラン時等の熱過渡条件下ではひずみ速度は高々 10⁻⁴/min であり、このような低ひずみ速度では動的再結晶が顕著に生ずることはない。一方、高速のひずみ速度は地震時に生ずるが、動的再結晶の検討を要するほどに大きな応力を生ずる場合には、ひずみ速度は約 100%/min 以上となる。従って、上記の考え方により材料強度基準を策定することは、妥当である。

3.4.2.5 設計クリープ破断応力強さ S_R

設計クリープ破断応力強さ S_R を適切に策定するためには、ハステロイ XR が使用される 400 °C から 1000 °C までという広範囲な温度域で、クリープ破断時間データと試験条件（温度、応力）を内・外挿等の観点から適切な相関式で表現する必要がある。

統計処理の容易さを考慮すると、次に示す時間

- ・温度パラメータ法（TTP 法）が適している。

(1) Larson - Miller パラメータ法

$$P \equiv T_k(Y + C) \quad (3.4.7)$$

(2) Orr-Sherby-Dorn パラメータ法

$$R = V - \Omega / (RT_{\infty}) \cdot \log_{10} e \quad (3.4.8)$$

(3) Manson-Succop パラメータ法

$$B = V - B T \cdot \quad (3.4.9)$$

上記の TTP 法において、Y は $\log_{10} t_R$ (t_R : クリープ破断時間) を表わし、 T_k は絶対温度(K)、P は時間・温度パラメータ、C, Q 及び B は材料定数である。ハステロイ XR のクリープ破断強度を数式化する方法は、この 3 種類の TTP 法のなかからクリープ破断強度データへのあてはめ性の他、設計評価、外挿性等の観点より選ぶこととする。Fig. 3.4.22 に、900°C における TTP 法による平均クリープ破断時間の比較を示す。データへのあてはめ性は標準誤差が 3 方法間であまり変わらないことから優劣はつけ難い。設計評価の観点からは、ハステロイ XR に対して構造評価上重要な高温・低応力領域では、3 種類の中で Orr - Sherby - Dorn 法が、最も安全側の値を示す。外挿性に関しては、比較的短時間のクリープ破断試験データ（3000 時間以下）に TTP 法を適用して予測した値と、長時間データも含めた全破断データに TTP 法を適用して予測した値を比較すると、Orr - Sherby - Dorn 法が Larson - Miller 法及び Manson - Sutcliffe 法よりも予測値が最も安全側の値を示す。一例として、Table 3.4.1 に、900°C における値を比較した結果を示す。また、この方法は温度に関してアレニウス則に従っていることから工学的実用性にも優れている。これらの理由により、ハステロイ XR のクリープ破断強度の数式化の方法としては、Orr - Sherby - Dorn パラメータ法を採用する。設計クリープ破断応力強さ S_R と最小クリープ破断時間 $t_{R, \min}$ は、Orr - Sherby - Dorn パラメータを用いてクリープ破断データの最小二乗近似により次式で表わすマスター曲線式から \overline{t}_R と $t_{R, \min}$ との関係式を用いて求める。

マスター曲線式：

$$\log_{10} \bar{t}_R = \frac{\bar{Q}}{R \cdot T_k} \cdot \log_{10} e = \sum_{i=0}^2 \bar{a}_i (\log_{10} \bar{\sigma}_R)^i \quad (3.4.10)$$

\bar{t}_c : 平均クリープ破断時間 (h)

$\bar{\sigma}_c$: 平均クリープ破断応力強さ (kg/mm²)

T_k : 絶対温度 (K)

$$\begin{aligned}
 R &: ガス定数 \\
 \bar{a}_0 &= -11.89 \\
 \bar{a}_1 &= -2.834 \\
 \bar{a}_2 &= -1.566 \\
 \bar{Q} &= 90203 \text{ (k cal/k mol)}
 \end{aligned}$$

\bar{t}_R と $t_{R,\min}$ との関係式：

$$t_{R,\min} = t_R / \alpha_R \quad (3.4.11)$$

即ち、次式より求める。

$$\log_{10} \alpha_R t_{R,\min} = \frac{\bar{Q}}{R \cdot T_k} \cdot \log_{10} e + \sum_{i=0}^2 \bar{a}_i (\log_{10} S_R)^i \quad (3.4.12)$$

ここで、時間係数 α_R は、クリープ破断時間データに対数正規分布を仮定して設計クリープ破断時間での破損確率が95%信頼下限を十分に下回り、かつ、高温構造設計方針のクリープ疲労損傷評価法に定める安全裕度の取り方と矛盾しない値として定めることとし、Fig. 3.4.23 より、 $\alpha_R = 10.0$ とする。

$S_R < 1.0 \text{ kg/mm}^2$ では上式を直線外挿して算出する。

なお、当該温度における設計引張強さ S_u を超えないものとした。

3.4.2.6 設計引張強さ S_u

各温度 $T(^{\circ}\text{C})$ における設計引張強さ $S_u(\text{kg/mm}^2)$ は、構造等の技術基準別表第10「材料の各温度における設計引張強さ」備考4の方法に準じて求めることとし、ハステロイXRの化学成分等の仕様はCo含有量を除きハステロイXの仕様と同じであることから、下式により求める。

$$S_u(T) = \alpha_{u,\min} \cdot \bar{\sigma}_u(T) \quad (3.4.13)$$

$S_u(T)$: 温度 T における設計引張強さ

$\bar{\sigma}_u(T)$: 温度 T における平均引張強さ

$$\alpha_{u,\min} = \min(0.885, \alpha_{RT})$$

0.885 : 構造等の技術基準に定めるステンレス鋼及び高ニッケル合金に対する統計上の信頼係数

α_{RT} : 室温における ASME B&PV Code Section III のハステロイXの 1/1.1 倍の値とハステロイXRの $\bar{\sigma}_u$ との比

ただし、高温側の引張強さの値が低温側の引張強さの値を超える場合は、低温側の極小値を超えないものとする。

Fig. 3.4.21 に、試験データと設計引張強さとの比較を示す。なお、引張試験は、800°C以下ではJISに従って行ない、800°Cを超える場合は引張速度を100%/minで行なっている。

3.4.2.7 設計緩和強さ S_r

設計緩和強さ S_r は、初期応力を $1.5 S_m$ とした応力緩和解析より算定する。

応力緩和解析は、3.4.2.17に示すクリープ式を用い、クリープ硬化則としてひずみ硬化則に従

うとした弾クリープ解析である。

応力緩和解析にあたって、 S_r を安全側に定めるためには、残留応力を低めに算出する必要がある。これは、 S_r は、ひずみ及びクリープ疲労損傷の制限に関する規定のなかで、クリープ下の繰返し負荷時における弾性応力範囲（非クリープ下のシェイクダウン応力範囲に対応する。）等を定める応力基準であるからである。このため、平均挙動を記述するクリープ式から求まる応力緩和速度 $\dot{\bar{\sigma}}_r$ を下式により速める。

$$\dot{S}_r = \alpha_r \dot{\bar{\sigma}}_r = -\alpha_r E \bar{\dot{\varepsilon}}_c \quad (3.4.14)$$

ここで、

S_r : S_r の応力緩和速度

α_r : 加速係数

E : 縦弾性係数

$\bar{\dot{\varepsilon}}_c$: $\dot{\varepsilon}_c(S_r, T, \varepsilon_c)$: 応力 S_r , 温度 T 及びクリープひずみ ε_c において平均挙動を記述するクリープ式から求まるクリープひずみ速度

3.4.2.8 許容ひずみ範囲 ϵ_t

許容ひずみ範囲の曲線、即ち、設計疲労曲線は、疲労試験データから平均疲労曲線を求め、これに安全裕度を乗じて定める。

平均疲労曲線は、FBR 方針材料強度基準等で用いている汎用回帰解析法⁽³²⁾により定める。即ち、基準とするひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ での疲労試験データから、全ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_t$ と破損サイクル数 N_t との関係を表わす回帰式を求め、この式に基づいてひずみ速度及び温度の効果を考慮する。

基準とするひずみ速度は、実機に生ずるひずみ速度のうち比較的高速なもの（地震時のひずみ速度等）を包絡する値であり、かつ、疲労試験技術上可能な最大ひずみ速度以下であるように選び、 10^{-3} (mm/mm/sec) とする。

平均疲労曲線から設計疲労曲線を求めるときの安全裕度は、破損サイクル数に対して 20、ひずみ範囲に対して 2 とする。即ち、平均疲労曲線に破損サイクル数で 1/20、ひずみ範囲で 1/2 を乗じた値のいずれか小さい方の値を包絡するよう設計疲労曲線を定める。

3.4.2.9 等時応力-ひずみ線図

等時応力-ひずみ線図は、ある温度 T における負荷応力と全ひずみ ε との関係を、負荷時間をパラメータにして表わした曲線である。 $t = 0$ の場合が、引張試験による応力-ひずみ曲線を表わし、 $t > 0$ の場合にはそれにクリープひずみを加える。

応力-ひずみ曲線は、応力 σ と全ひずみ ε との関係を次式で表わす。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + A (\sigma - \sigma_p)^n \quad (3.4.15)$$

E : 縦弾性係数

σ_p : 比例限度

A, n : 温度に依存する材料定数

E, σ_p, A 及び n は、引張試験から得られる応力-ひずみ曲線ごとにそれぞれの値を求め、各

々について得られた全データから温度に関する回帰式を定め、これらの回帰式から求める。

クリープひずみは、3.4.2.17に示すクリープ式から求める。

3.4.2.10 縦弾性係数E

縦弾性係数E (kg/mm²) は、3.4.2.9に述べたとおり、応力-ひずみ曲線データから定まる、次に示す回帰式より求める。

$$E = -7.3 T + 20000 \quad (3.4.16)$$

ここで、T : 温度 (°C)

3.4.2.11 ポアソン比ν

ポアソン比νは、試験データより0.3とする。

3.4.2.12 热膨張係数α

热膨張係数αは、ハステロイXについてのCabot社のカタログデータに基づき⁽³³⁾、ハステロイXの試験データにより確認のうえ、定める。

3.4.2.13 累積クリープ疲労損傷係数の制限値D

Dの値は、低サイクル疲労試験結果に基づき、実機のひずみ速度、保持時間等の条件を考慮して下式により求める $D_f + D_c$ の下限包絡値として定める。

$$D_f = \frac{N}{\bar{N}_f} \quad , \quad D_c = \int_0^t \frac{dt}{t_R(\sigma)} \quad (3.4.17)$$

ここで、
N : 破損サイクル数

\bar{N}_f : 基準ひずみ速度 (10^{-3} mm/mm/sec) での対称三角波試験から求まる平均破損サイクル数

t : 破損までの時間

σ : 試験片に生ずる応力

$t_R(\sigma)$: 応力σでの平均クリープ破断時間

Fig. 3.4.24は、対称三角波試験でひずみ速度をパラメータとしたときの900°Cにおける D_f と D_c の値を示したもので、Fig. 3.4.25は、ひずみ速度を 10^{-3} mm/mm/secとして保持時間をパラメータとしたときの D_f と D_c の値を示したものである⁽³⁴⁾。両図において、点線はひずみ速度を遅くしていくとき及び保持時間を長くしていくときの傾向を目視により推定したものである。

両図において $D_f + D_c = D$ の値が1（両図中に実線で示す）を下廻ることはないこと、並びに高温工学試験研究炉の使用条件下では $D_f \sim 0.0$ であり、このときには原理的に $D_c \geq 1$ となることから、 $D = 1$ とする。

3.4.2.14 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数D*

(1次+2次)応力に関する緩和クリープ損傷係数D*は、長期1次応力が低い場合に、(1次+2次)応力が初期応力 S_i から応力水準 S_g まで応力緩和する間に累積するクリープ損傷を表わす。

初期応力 S_i の設定方法及び応力緩和挙動の算出方法は、FBR方針の解説⁽³⁵⁾に示されている方

法を適用する。

3.4.2.15 ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数D**

ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数D**は、ひずみ範囲を ϵ_t とするピーク応力が応力水準 S_g まで応力緩和する間に累積するクリープ損傷を表わす。

ひずみ範囲を ϵ_t とするピーク応力 S_i の設定方法及び応力緩和挙動の算出方法は、FBR方針の解説⁽²⁶⁾に示されている方法を適用する。

3.4.2.16 ヘリウム環境効果(くされ代)

ハステロイXRは、高温工学試験研究炉のヘリウムガス雰囲気下では酸化腐食し、Fig. 3.4.26に示すように表層にCr及びMnの欠乏層を生ずるが、酸化腐食により減肉することはない⁽³⁶⁾ので、ガス接面にくされ代を考慮する必要はないと考えられる。しかし、高温ヘリウムガス雰囲気での使用実績が豊富でないことを考慮し、保守的にCr欠乏層深さdの1/2をくされ代とする。Cr欠乏層深さdは、Fig. 3.4.21に示す高温工学試験研究炉の1次冷却材による環境効果を模擬するように不純物含有量を調整したヘリウムガス(原研B型ヘリウム)雰囲気下の試験データの回帰式から求める。

また、引張強度やクリープ強度等が大気中よりも低下することはないので、大気中及びヘリウム中で取得したデータより定めた材料強度基準等を特に補正することなく適用する。

3.4.2.17 クリープ式

高温工学試験研究炉の中間熱交換器等の高温機器の設計にはクリープ解析法が必要であり、信頼性の高いクリープ解析法を定めるにはクリープ式(Creep Equation)をクリープ曲線データから精度良く定めなければならない。クリープ曲線はある一定の試験温度及び負荷応力(あるいは荷重)のもとで、クリープひずみが時間とともにどのように増加していくかを表わすものであるので、クリープ式は、クリープひずみを時間、温度、応力の関数として表わす。クリープ式の作成方法は、まずクリープ曲線を時間の関数として数式化し、次にこの時間関数の各定数(あるいはパラメータ)について温度・応力依存性を定めることとする。

(1) 時間関数

時間関数としては1次クリープ域から2次クリープ域への連続性、実績並びにデータ解析の容易さ等から以下の2形式を候補として選定した。

① Garofalo型⁽³⁸⁾(Gittusによる転移論モデル)

$$\epsilon_c = \epsilon_t (1 - e^{-rt}) + \dot{\epsilon}_{min} t \quad (3.4.18)$$

② 有理式⁽³⁹⁾

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_t r t}{1 + r t} + \dot{\epsilon}_{min} t \quad (3.4.19)$$

ここで、

ϵ_c : クリープひずみ

t : 時間

ϵ_t : 最大1次クリープひずみ成分

r : 1次クリープの時定数の逆数

$\dot{\epsilon}_{\min}$: 最小クリープひずみ速度

クリープ曲線データから3つのパラメータのうち r の値を決める方法として平均値法と95%法を考えた。二形式について、それぞれの r の算出法は次のとおりである。

(イ) 平均値法

1次クリープ域の各データ組 $(\epsilon_{c,i}, t_i)$ に対して r_i を求めて、それを平均する。

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum r_i \quad (3.4.20)$$

r_i は $(\epsilon_{c,i}, t_i)$ の各データ組から求まる値で、Garofalo型の場合には次式から求まる。

$$r_i = \frac{1}{t_i} \log_e \frac{\epsilon_t}{\epsilon_t - (\epsilon_{c,i} - \dot{\epsilon}_{\min} \cdot t_i)} \quad (3.4.21)$$

有理式の場合には次式から求まる。

$$r_i = \frac{1}{t_i} \frac{\epsilon_{c,i} - \dot{\epsilon}_{\min} \cdot t_i}{\epsilon_t - (\epsilon_{c,i} - \dot{\epsilon}_{\min} \cdot t_i)} \quad (3.4.22)$$

(ロ) 95%法

1次クリープひずみ成分が ϵ_t の95%となる時間 $t_{95\%}$ から r を求める。 $t_{95\%}$ は、1次クリープ域のクリープ曲線データの2次多項式近似から求める。Garofalo型の場合には、次式から求まる。

$$\epsilon_c^1 = 0.95 \epsilon_t = \epsilon_t (1 - e^{-rt_{95\%}}) \quad (3.4.23)$$

$$\therefore r = \frac{1}{t_{95\%}} \log_e 20 \quad (3.4.24)$$

有理式の場合には、次式から求まる。

$$\epsilon_c^1 = 0.95 \epsilon_t = \frac{\epsilon_t r t_{95\%}}{1 + r t_{95\%}} \quad (3.4.25)$$

$$\therefore r = \frac{0.95}{0.05} - \frac{1}{t_{95\%}} \quad (3.4.26)$$

クリープ式の時間関数をデータから定める方法として、上記の組合せの4方法についてハステロイXRへの適用性を検討した結果、クリープ曲線データと各方法による予測値との残差平方和が最小となる方法を集積すると下図のようになる。また、有理式の平均値法は r をマイナスに算出する場合が多かった。

以上のこと並びに応力緩和挙動の予測性の検討から、Garofalo型が時間関数として最も適切であり、更に、このGarofalo型方程式のなかの r をクリープ曲線データから求める方法としては、95%法が最も適切である。

Garofalo型 95%法	Garofalo型 平均値法	有理式 95%法	有理式 平均値法
(36)	(20)	(14)	(7)

() 内は上記の方法が最小残差平方和となった曲線の数

代表的なクリープ曲線データについて、Garofalo型の二方法並びに有理式の95%法の適合度をFig. 3.4.27に示す。

(2) 定数の温度・応力依存性

上記のGarofalo型クリープ式中の定数 ϵ_t , r 及び $\dot{\epsilon}_{min}$ のうち、 $\dot{\epsilon}_{min}$ の温度・応力依存性は3.4.2.1に示した。

ϵ_t の温度・応力依存性については、Fig. 3.4.28に示す試験データより、次のことが明らかである。

- ① 明確な温度依存性は観察されない。
- ② 応力が約4kg/mm²以上では明確な応力依存性が観察されない。一方、4kg/mm²以下では、応力が低くなるに従い ϵ_t が増加している。

また、990°C, 0.5kg/mm²でのクリープ試験の結果は $\epsilon_t \approx 0.0$ （%）となっていることより、応力がほぼ0であると $\epsilon_t \approx 0.0$ になると考えられる。

以上より、 ϵ_t の回帰式は以下とした。

応力 $\sigma > 4$ kg/mm²では、

$$\epsilon_t = 0.056 \text{ (%) } \quad (3.4.27)$$

2kg/mm² < $\sigma \leq 4$ kg/mm²では、

$$\epsilon_t = -0.0578 + 0.454/\sigma \quad (\%)^{(22)} \quad (3.4.28)$$

0.5kg/mm² < $\sigma \leq 2$ kg/mm²では、

$$\epsilon_t = 0.169 \quad (\%) \quad (3.4.29)$$

$\sigma \leq 0.5$ kg/mm²では、

$$\epsilon_t = 0.169 + \sigma/0.5 \quad (\%) \quad (3.4.30)$$

r の温度・応力依存性については、Fig. 3.4.29に示す試験データより、回帰式は以下とした。

$$\log_{10} r = -3.144 - 2.826 \times \sigma + 3.98 \times 10^{-3} \times \sigma \times T^{(22)} \quad (3.4.31)$$

ここで、 r （%/h）

σ ：応力 (kg/mm²)

T：温度 (°C)

なお、上式では、応力が 0 でも r が有限な値となってしまうため、 $\sigma < 0.5 \text{ kg/mm}^2$ では以下としている。

$$r = r_{0.5} + \frac{\sigma}{0.5} \quad (3.4.32)$$

ここで、 $r_{0.5} = -3.144 - 2.826 \times 0.5 + 3.98 \times 10^{-3} \times 0.5 \times T$

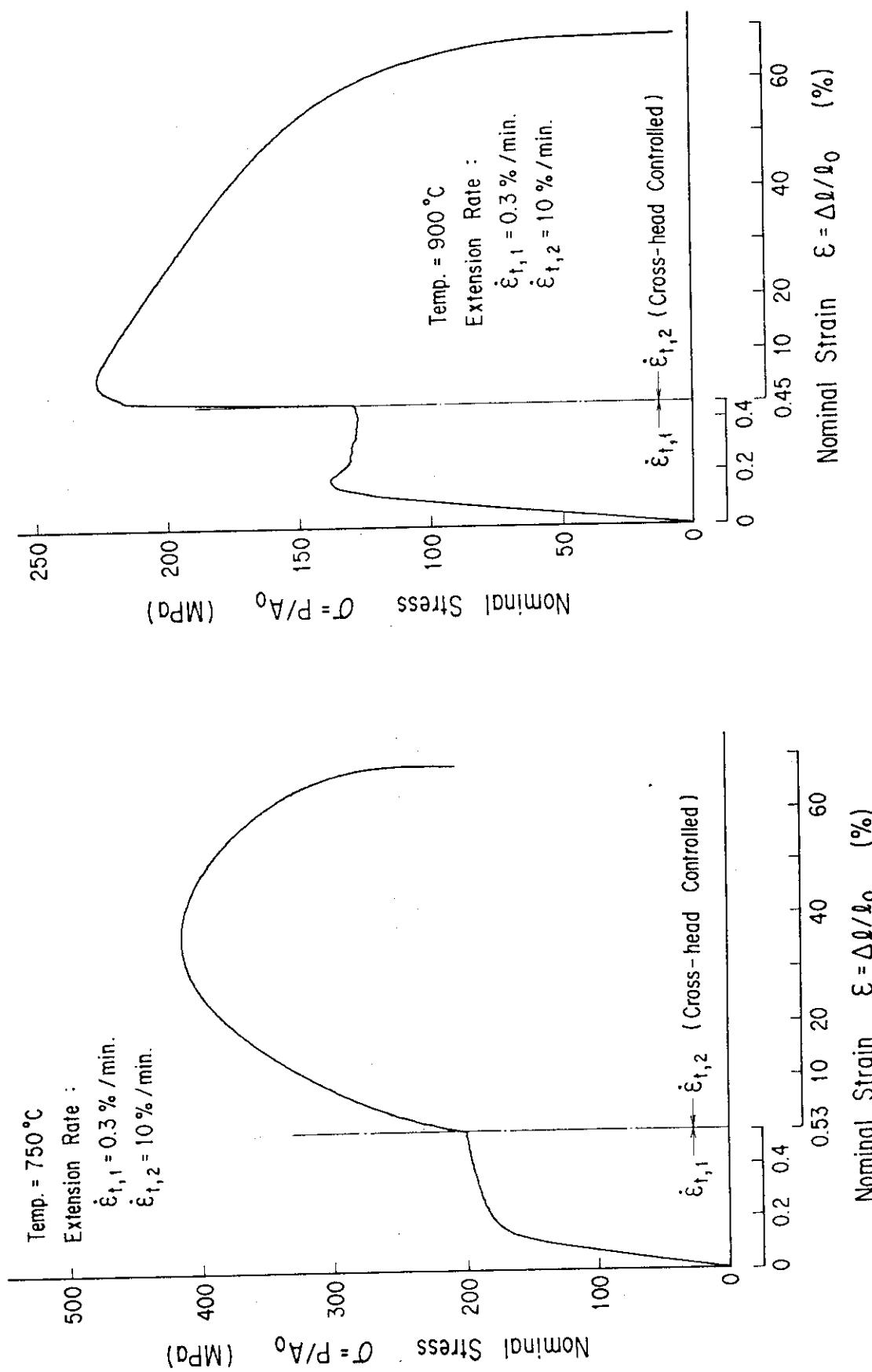


Fig. 3.4.1 Stress-Strain Curve for Hastelloy XR
(750°C, Extension Rate = JIS)

Fig. 3.4.2 Stress-Strain Curve for Hastelloy XR
(900°C, Extension Rate = JIS)

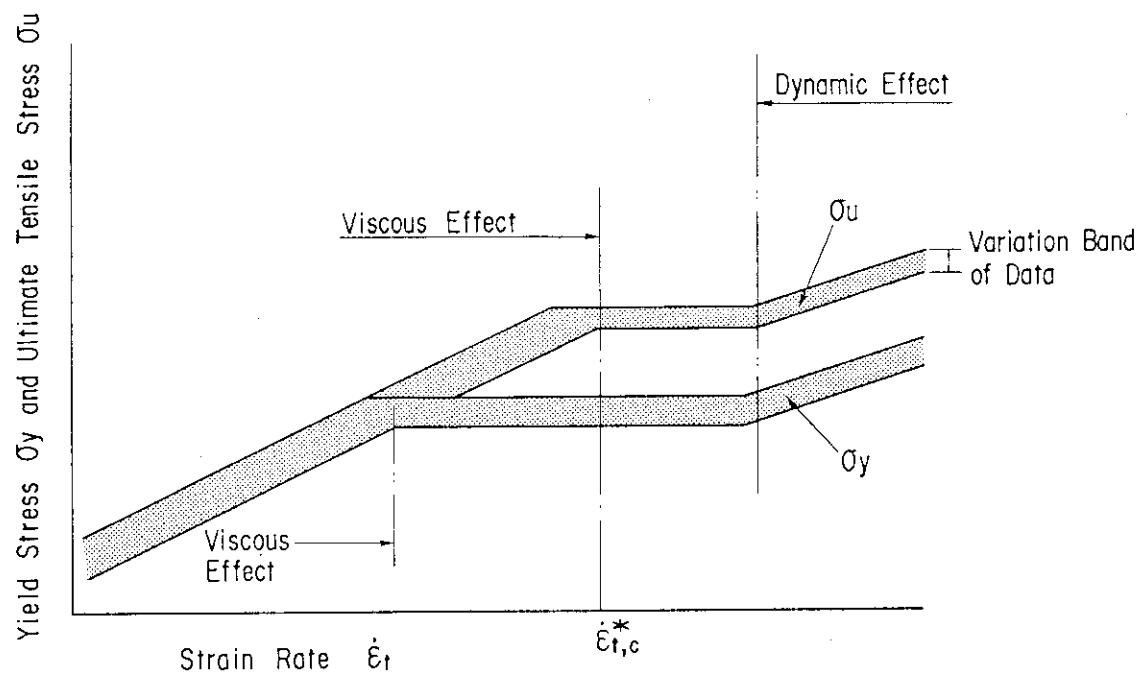


Fig. 3.4.3 Schematic Illustration of Tensile Strength Dependence
on Strain Rate

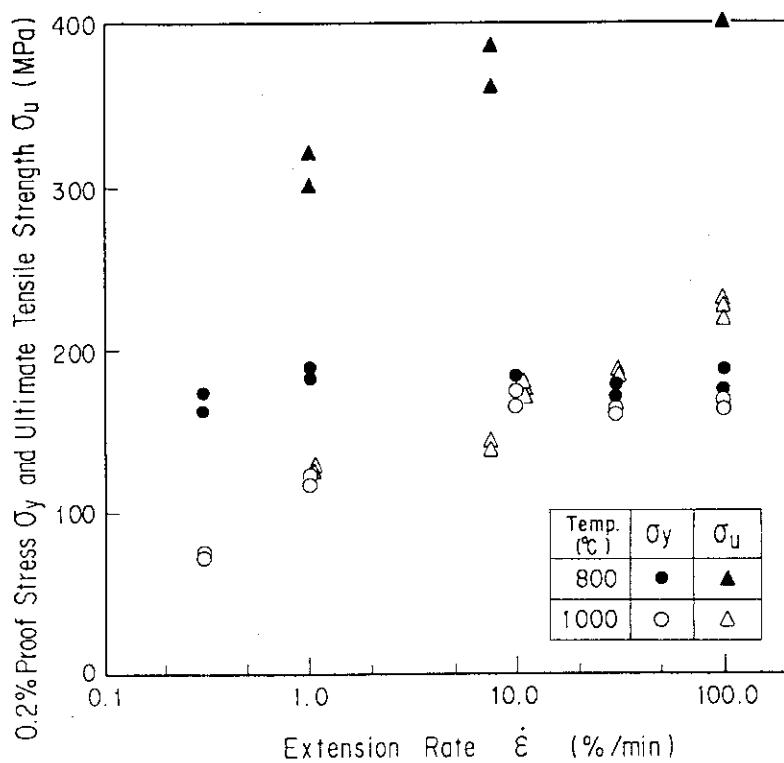


Fig. 3.4.4 Extension Rate Dependence of Tensile Strengthes
for Hastelloy XR

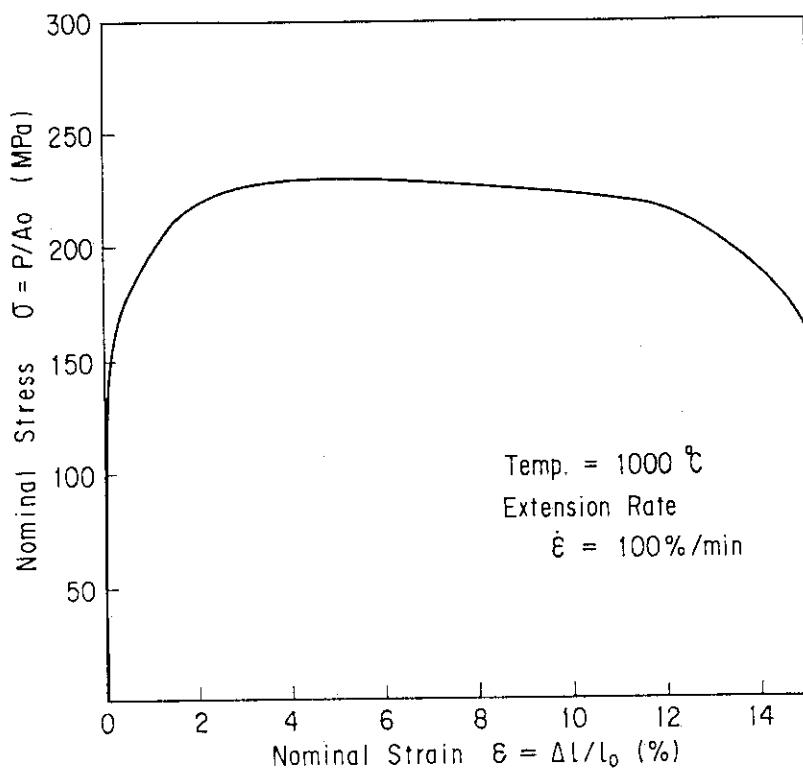


Fig. 3.4.5 Stress-Strain Curve for Hastelloy XR
(1000°C, Extension Rate = 100% min)

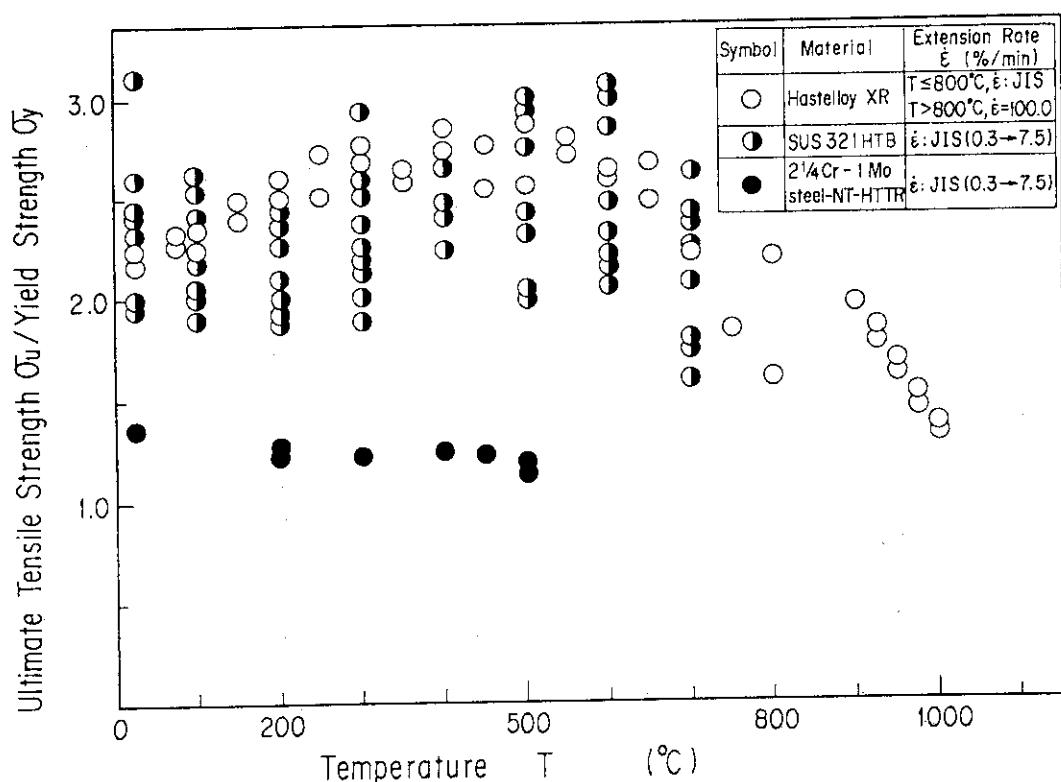


Fig. 3.4.6 Ratios of Ultimate Tensile Strength to Yield Strength
for Several Heat-Resistant Materials⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾

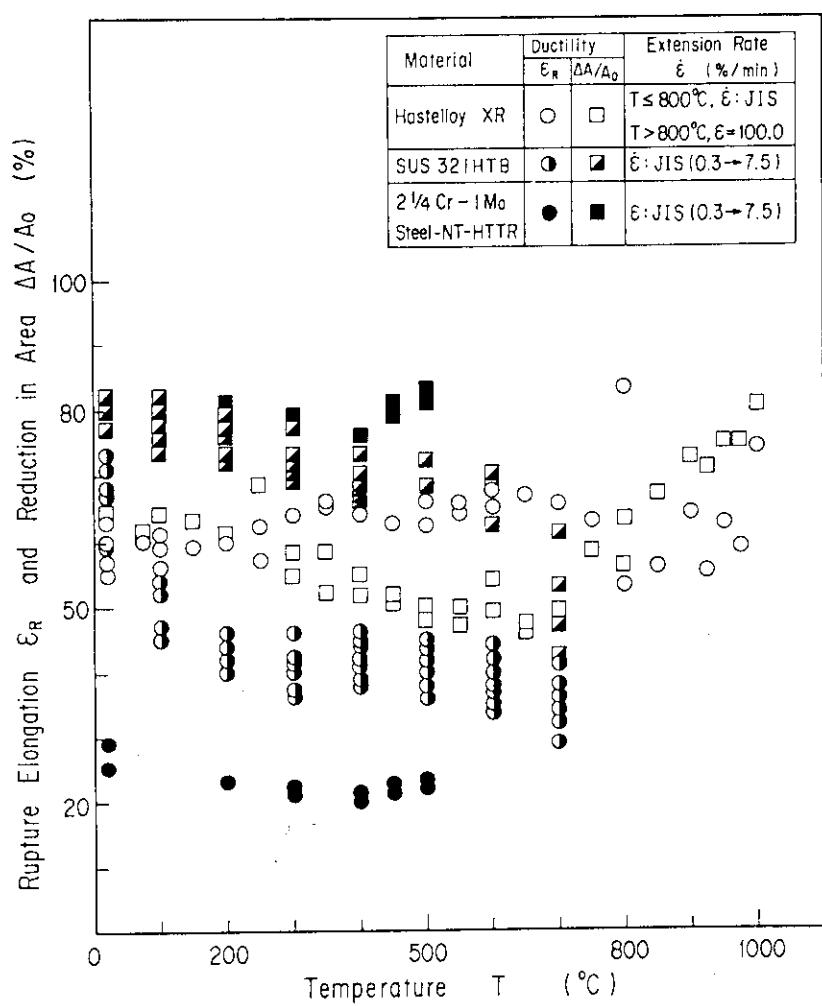
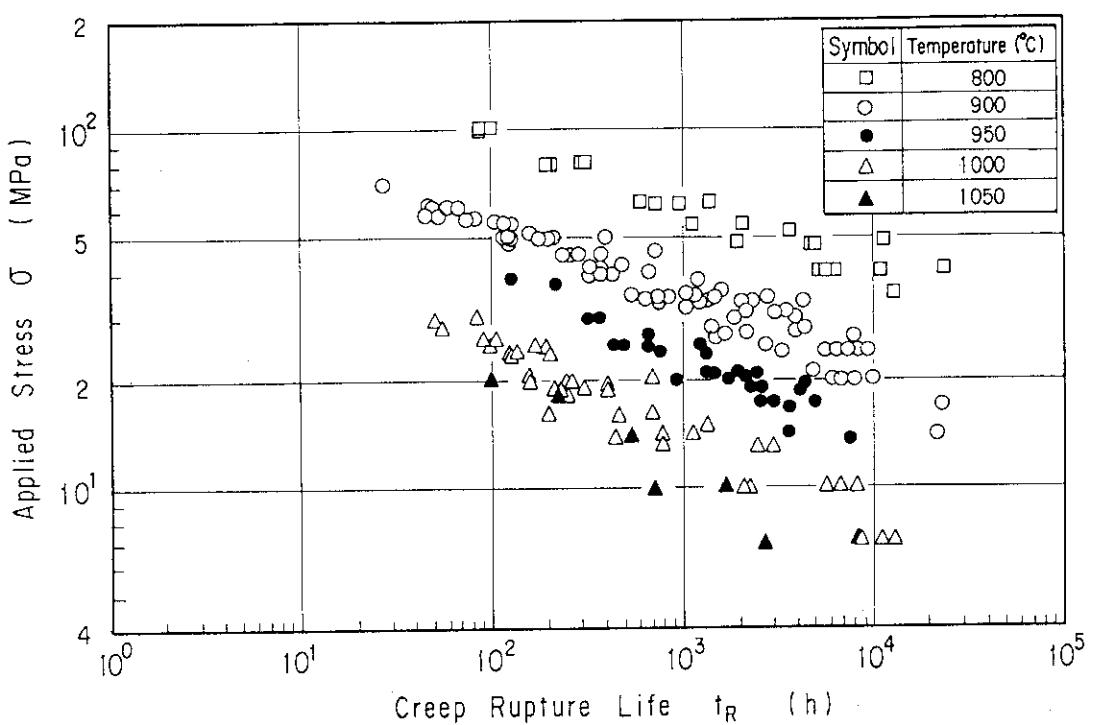
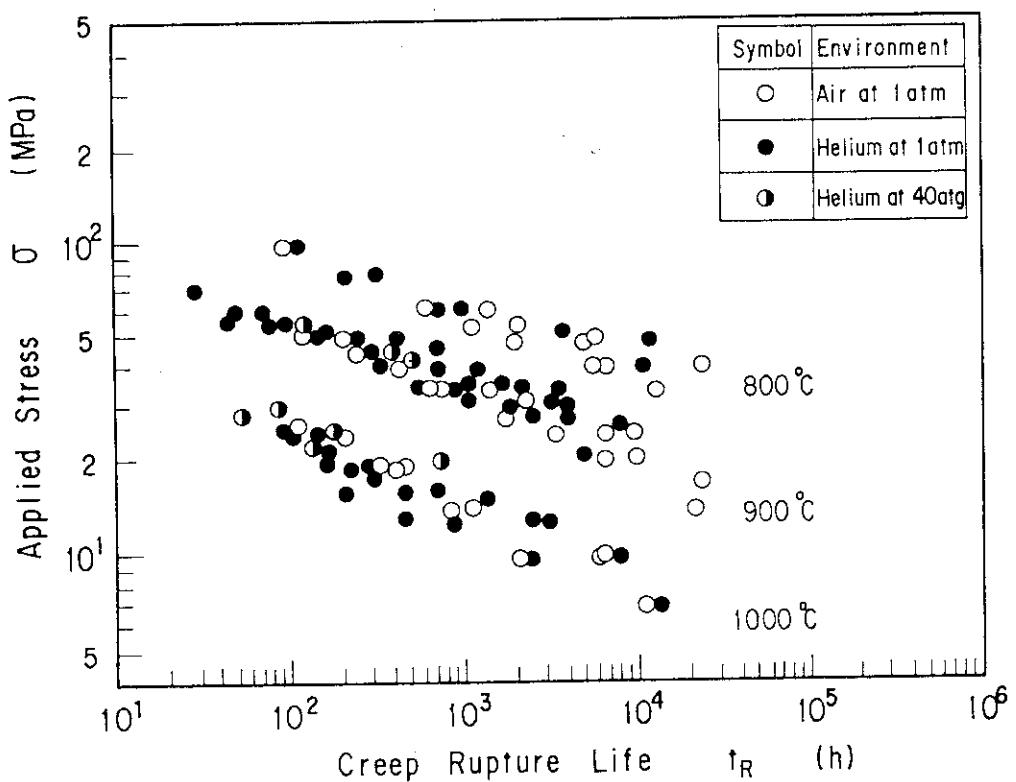


Fig. 3.4.7 Tensile Rupture Ductilities for Several Heat-Resistant Materials (18)(19)(20)(21)

Fig. 3.4.8 Creep Rupture Life for Hastelloy XR⁽²²⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾Fig. 3.4.9 Helium Environmental Effect on Creep Rupture Strength for Hastelloy XR⁽²²⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾

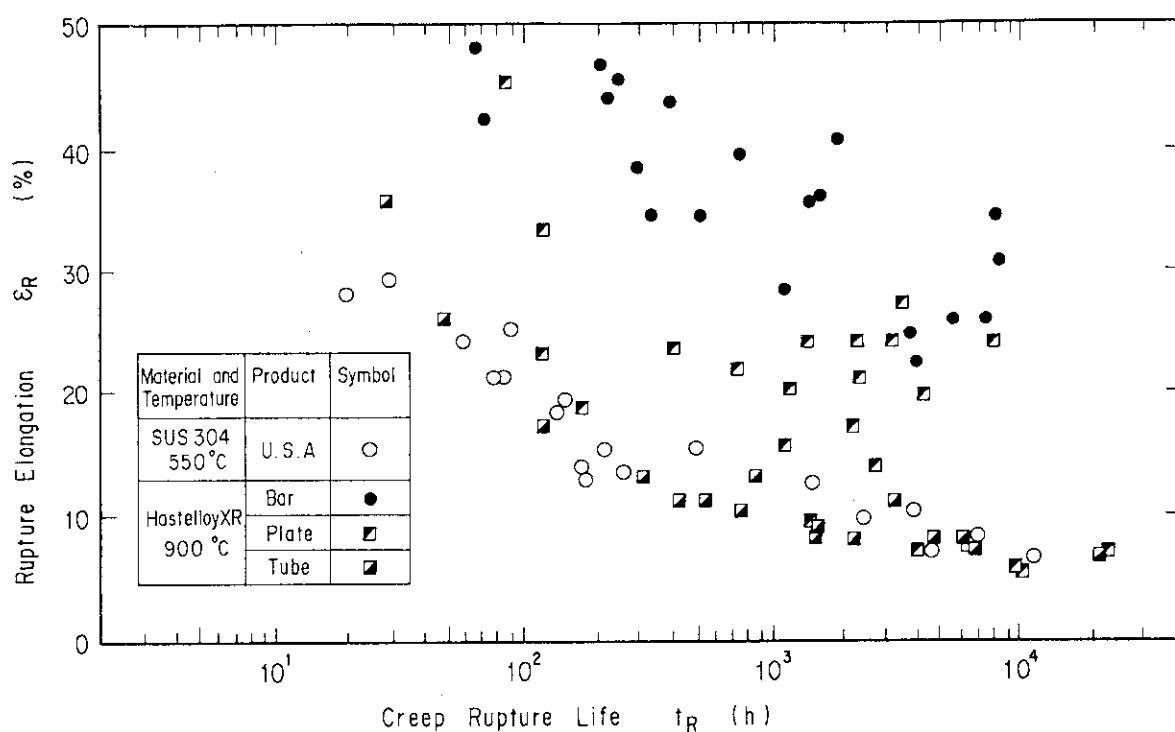


Fig. 3.4.10 Comparison of Creep Rupture Elongation between Hastelloy XR(22)(23)(24) and SUS 304(26)

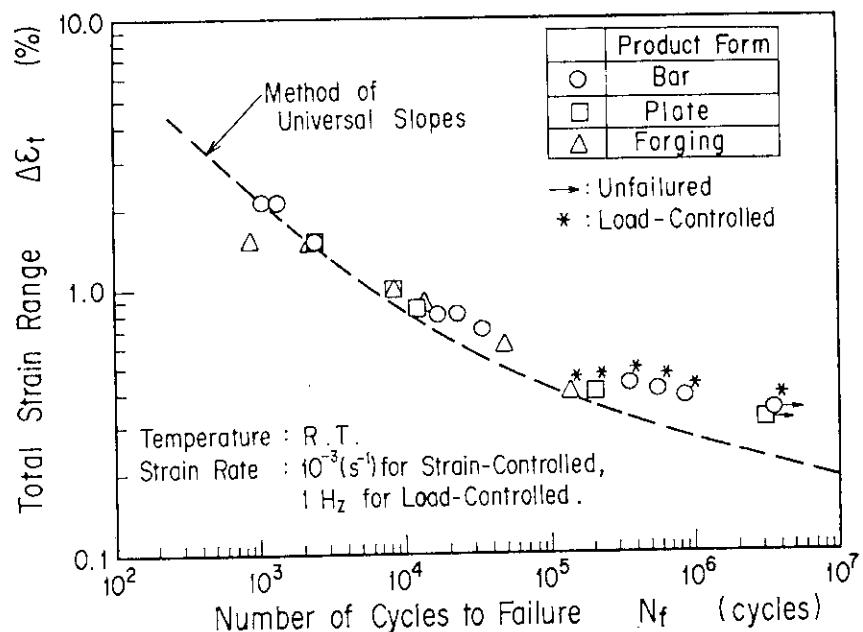


Fig. 3.4.11 Fatigue Strength for Hastelloy XR at Room Temperature

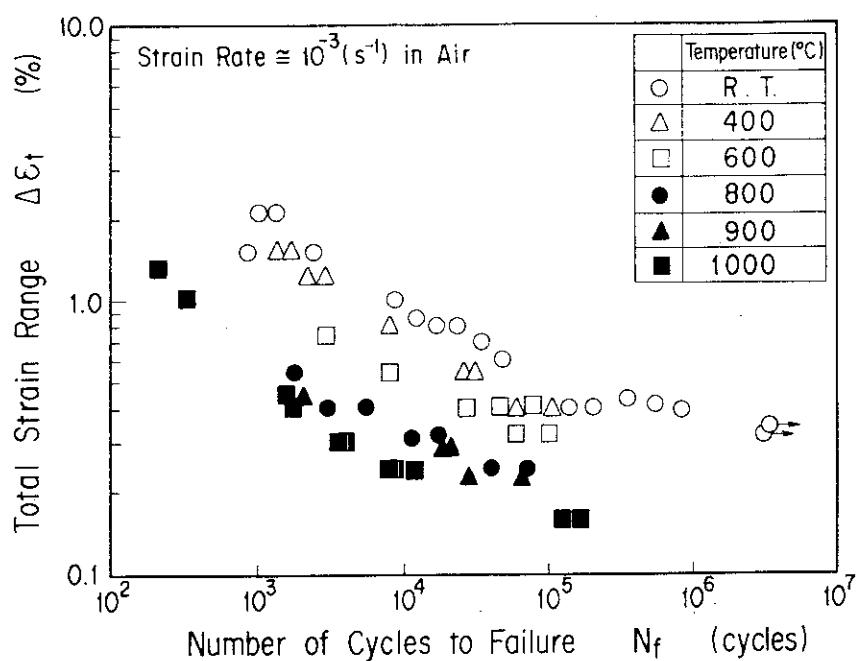


Fig. 3.4.12 Temperature Dependence of Fatigue Strength for Hastelloy XR

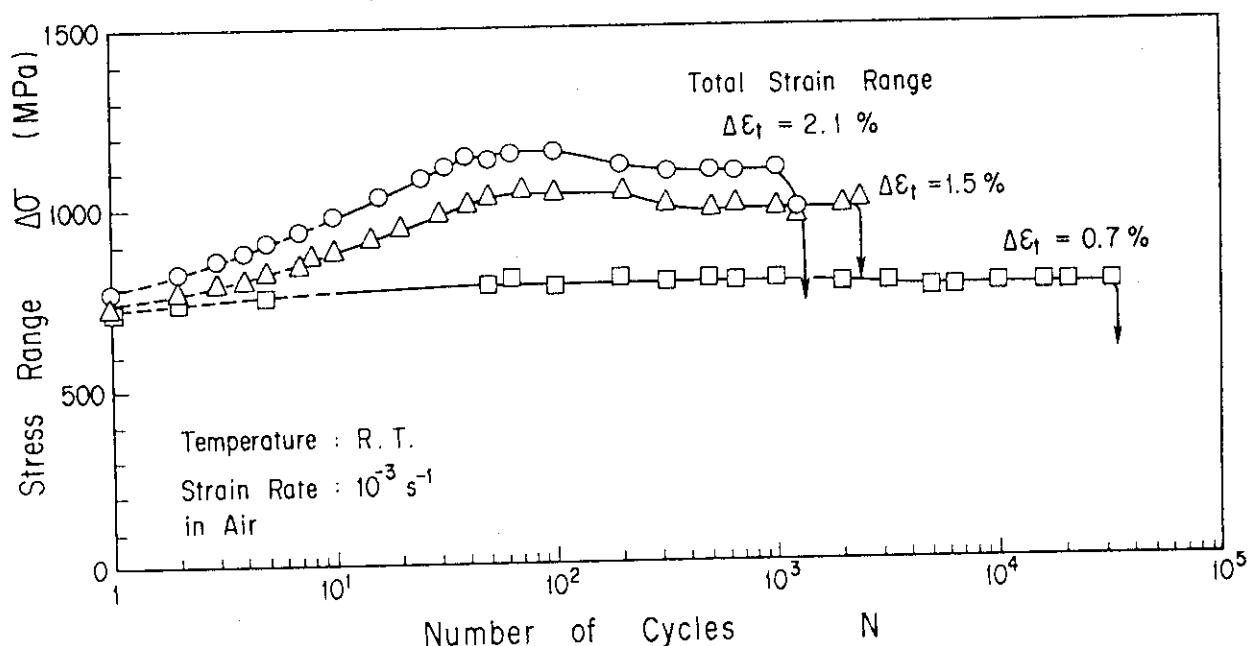


Fig. 3.4.13 Cyclic Stress Characteristics of Hastelloy XR at Room Temperature

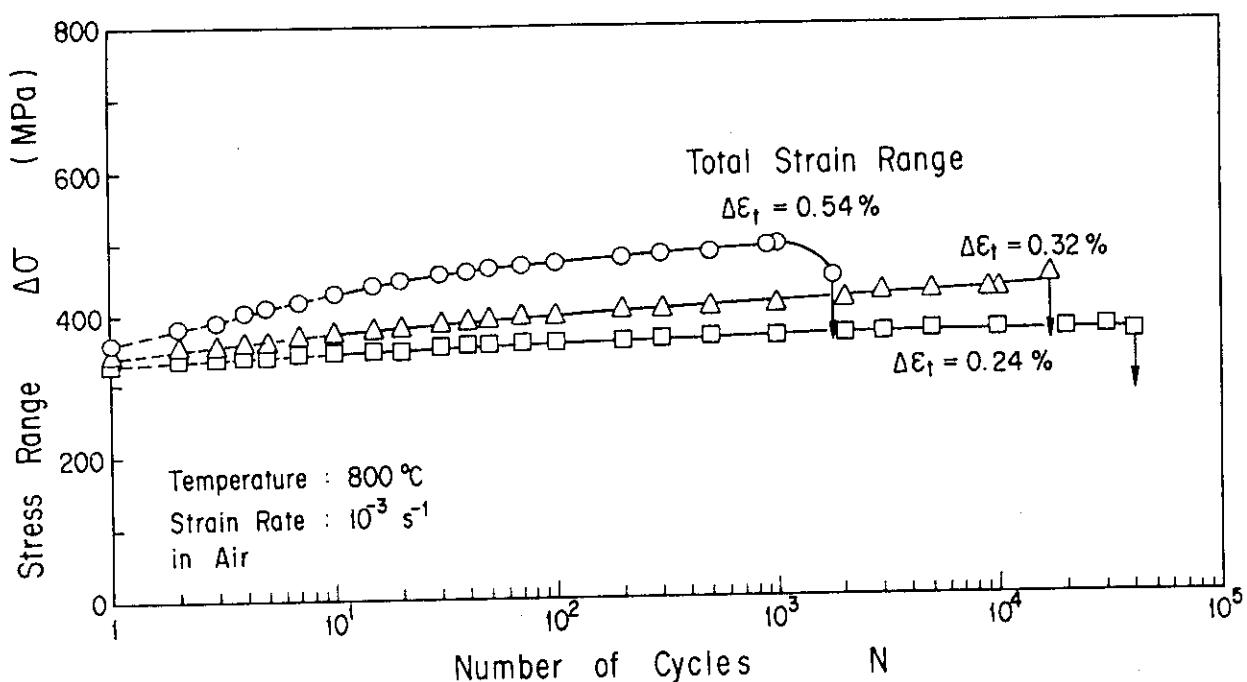


Fig. 3.4.14 Cyclic Stress Characteristics of Hastelloy XR at 800°C

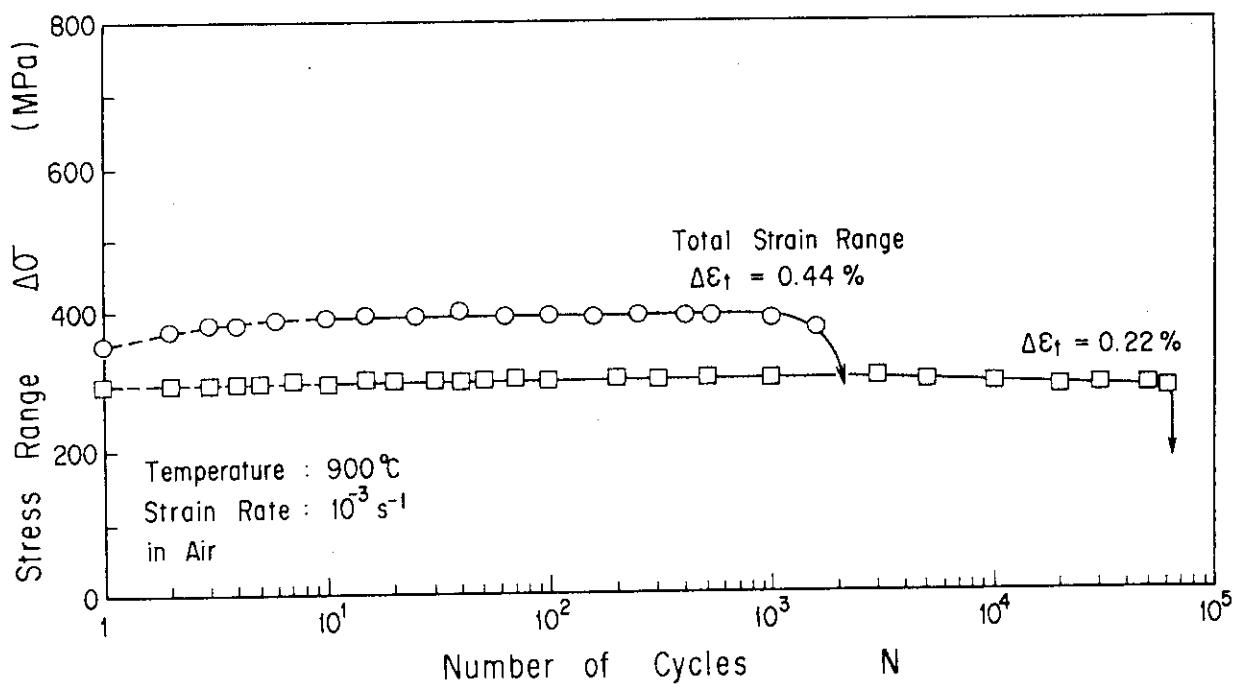


Fig. 3.4.15 Cyclic Stress Characteristics of Hastelloy XR at 900°C

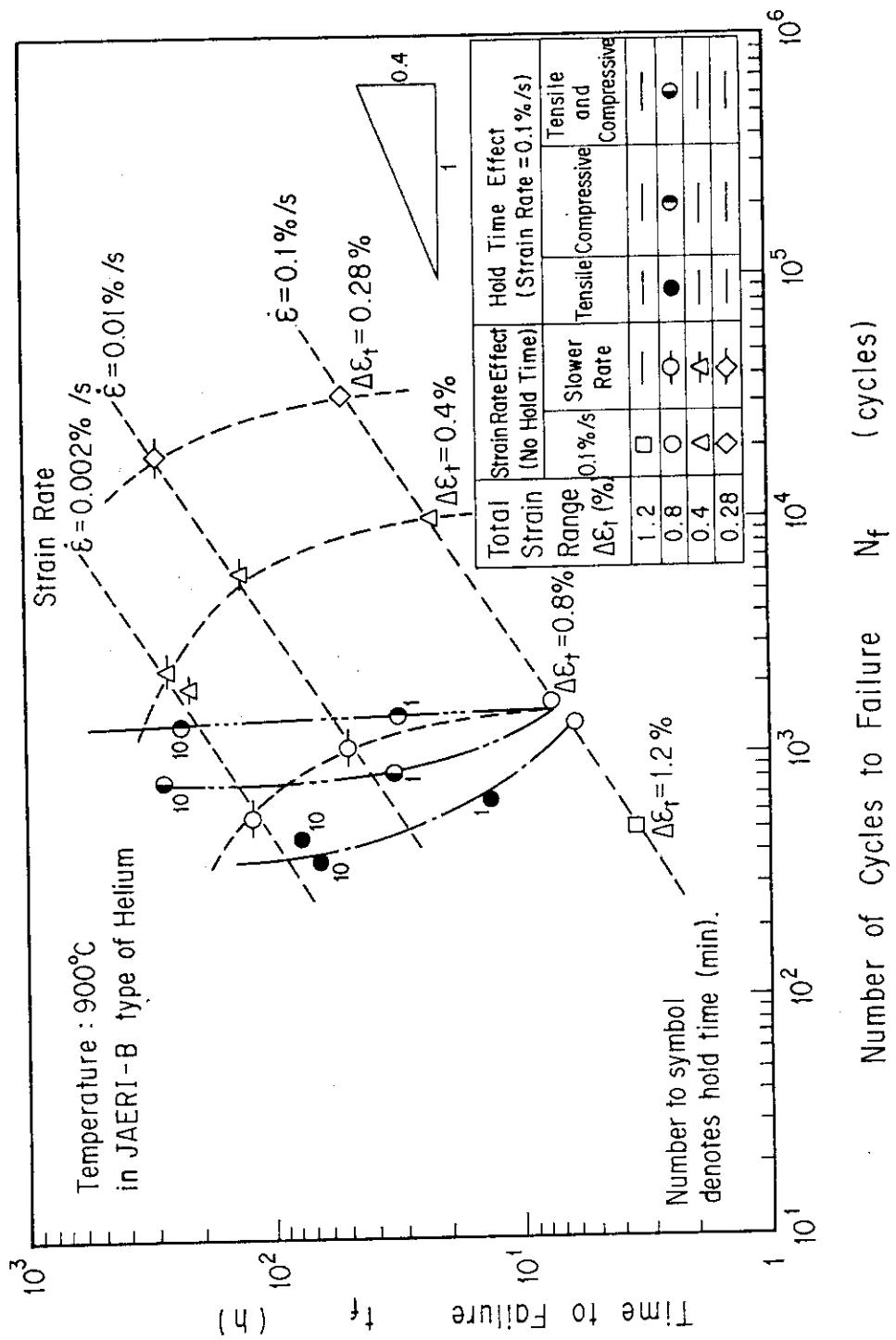


Fig. 3.4.16 Creep-Fatigue Interaction for Hastelloy XR
(Experimental data are referred to Ref.(30))

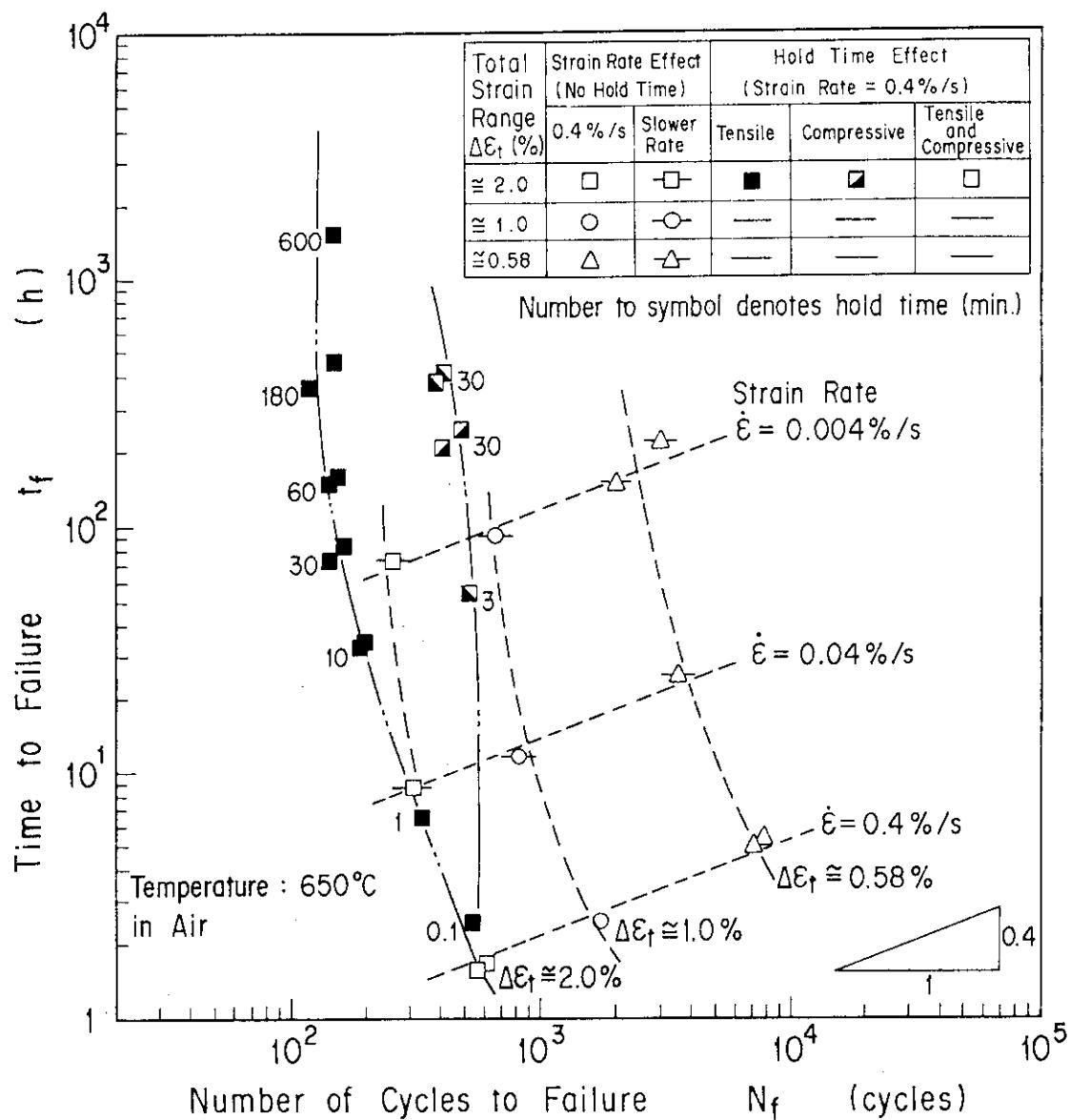


Fig. 3.4.17 Creep-Fatigue Interaction for SUS304
(Experimental data are referred to Ref.(28))

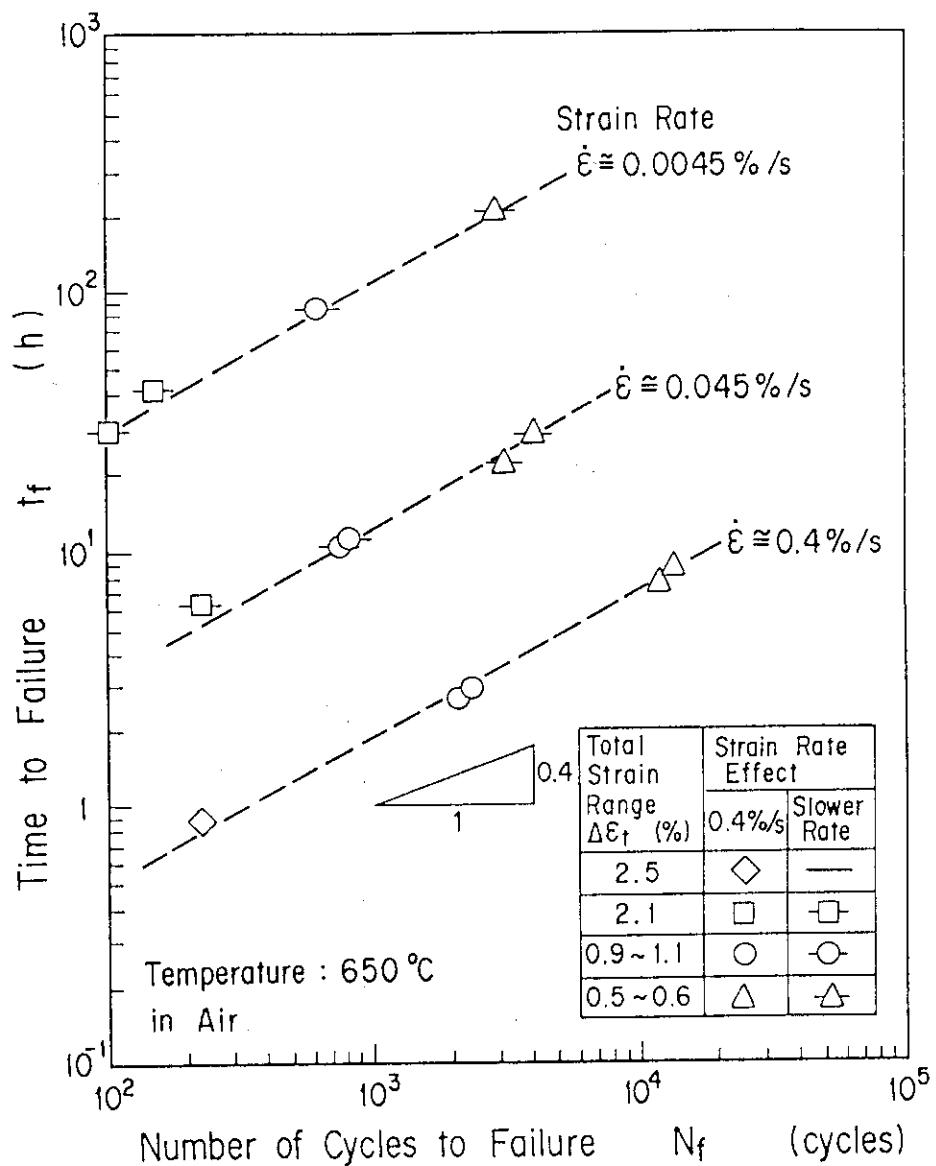


Fig. 3.4.18 Creep-Fatigue Interaction for SUS316
(Experimental data are referred to Ref.(28))

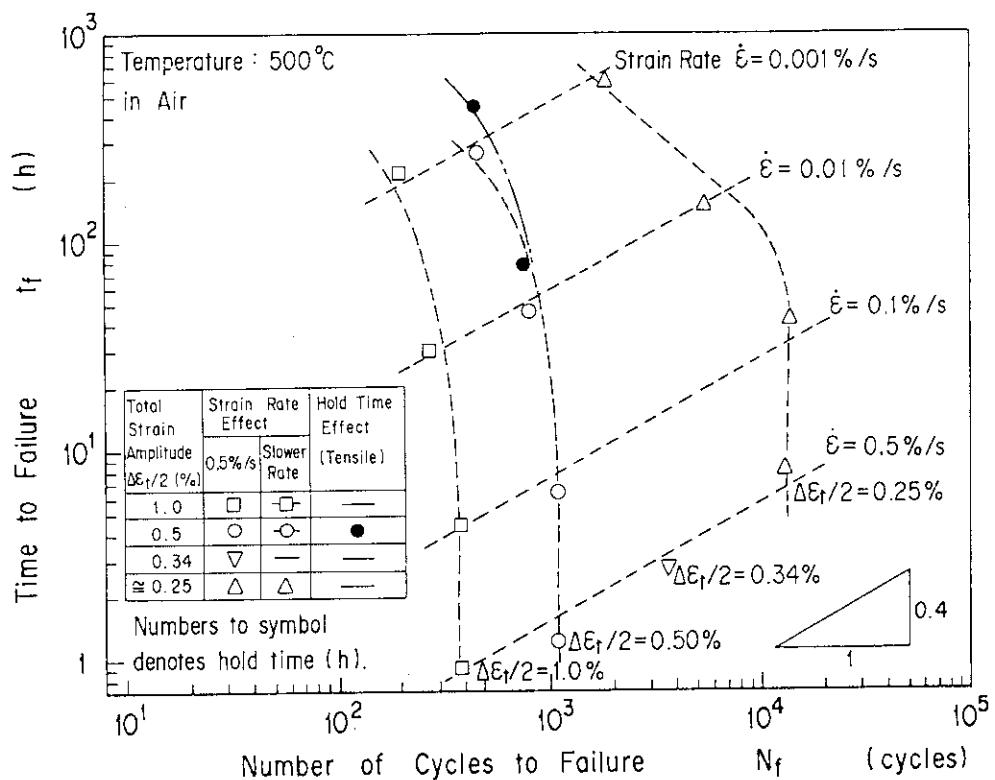


Fig. 3.4.19 Creep-Fatigue Interaction for 2 1/4Cr-1Mo Steel-NT Material (Experimental data are referred to Ref.(11))

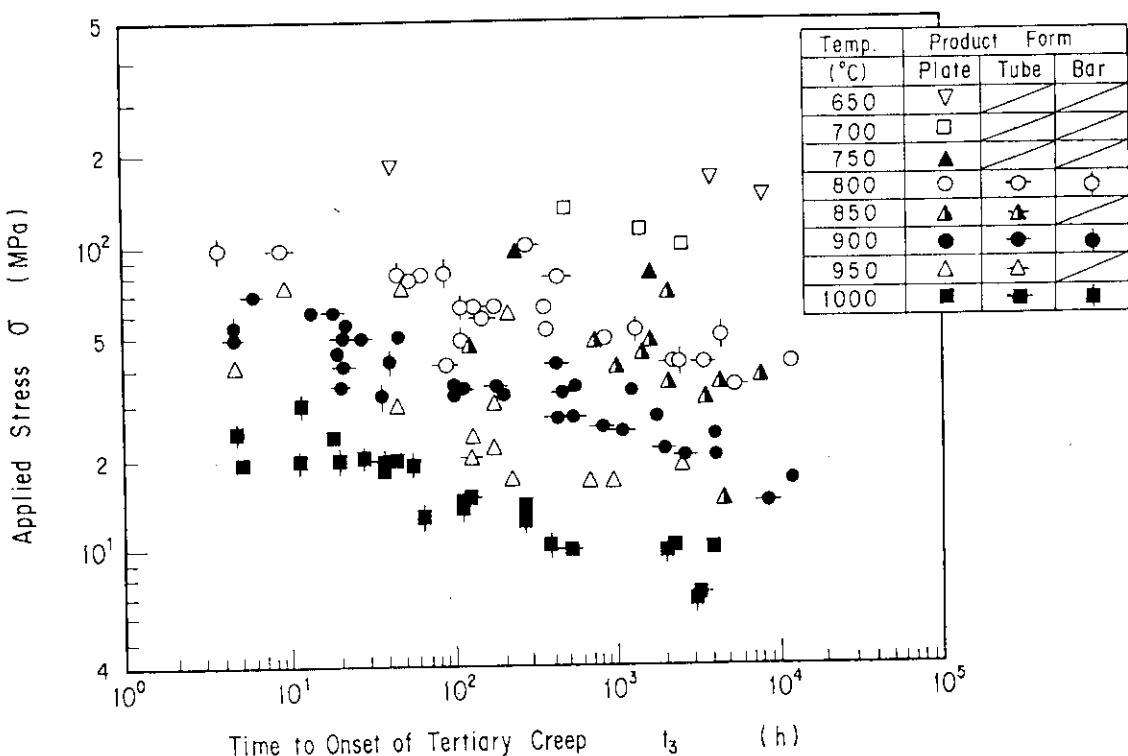


Fig. 3.4.20 Time to Onset of Tertiary Creep for Hastelloy XR

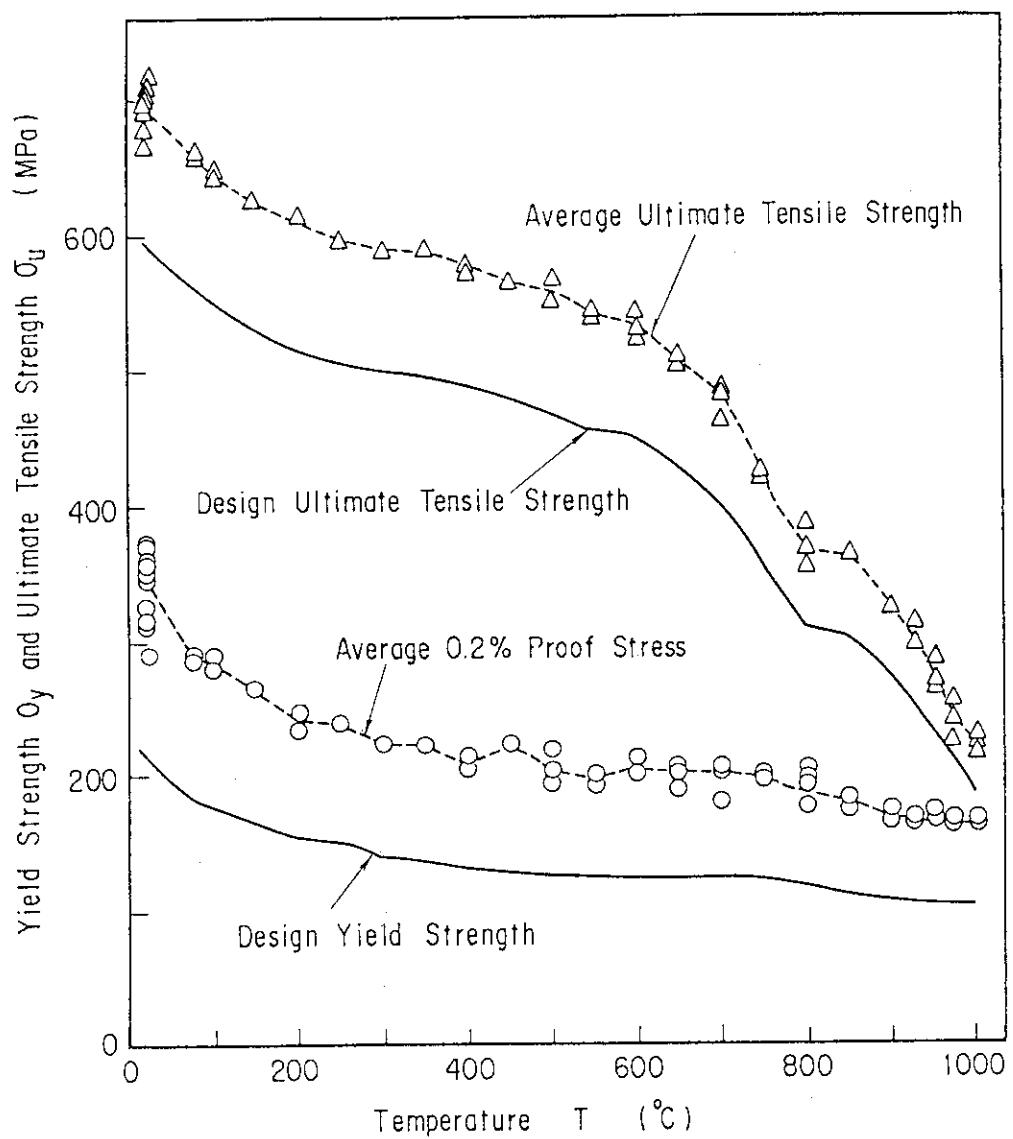


Fig. 3.4.21 Design Yield Strength and Ultimate Tensile Strength Curves for Hastelloy XR

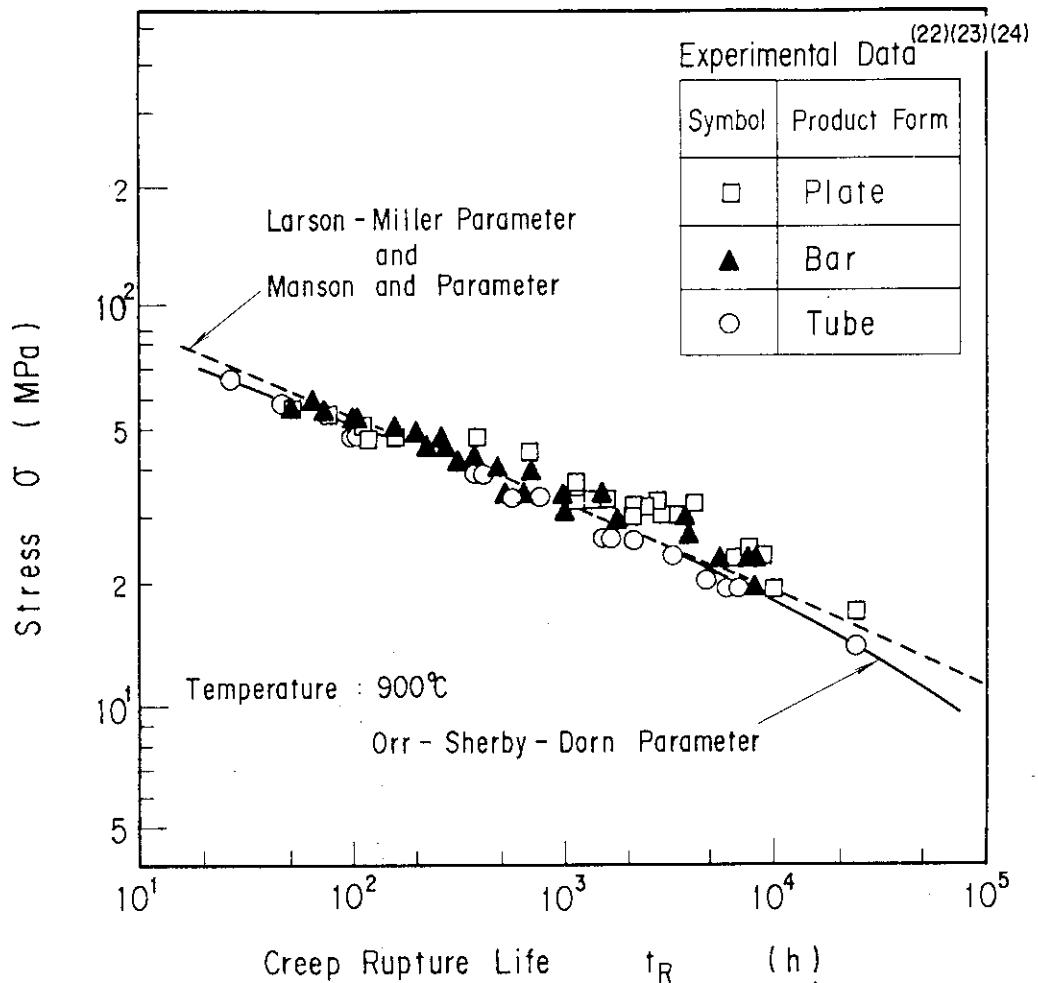
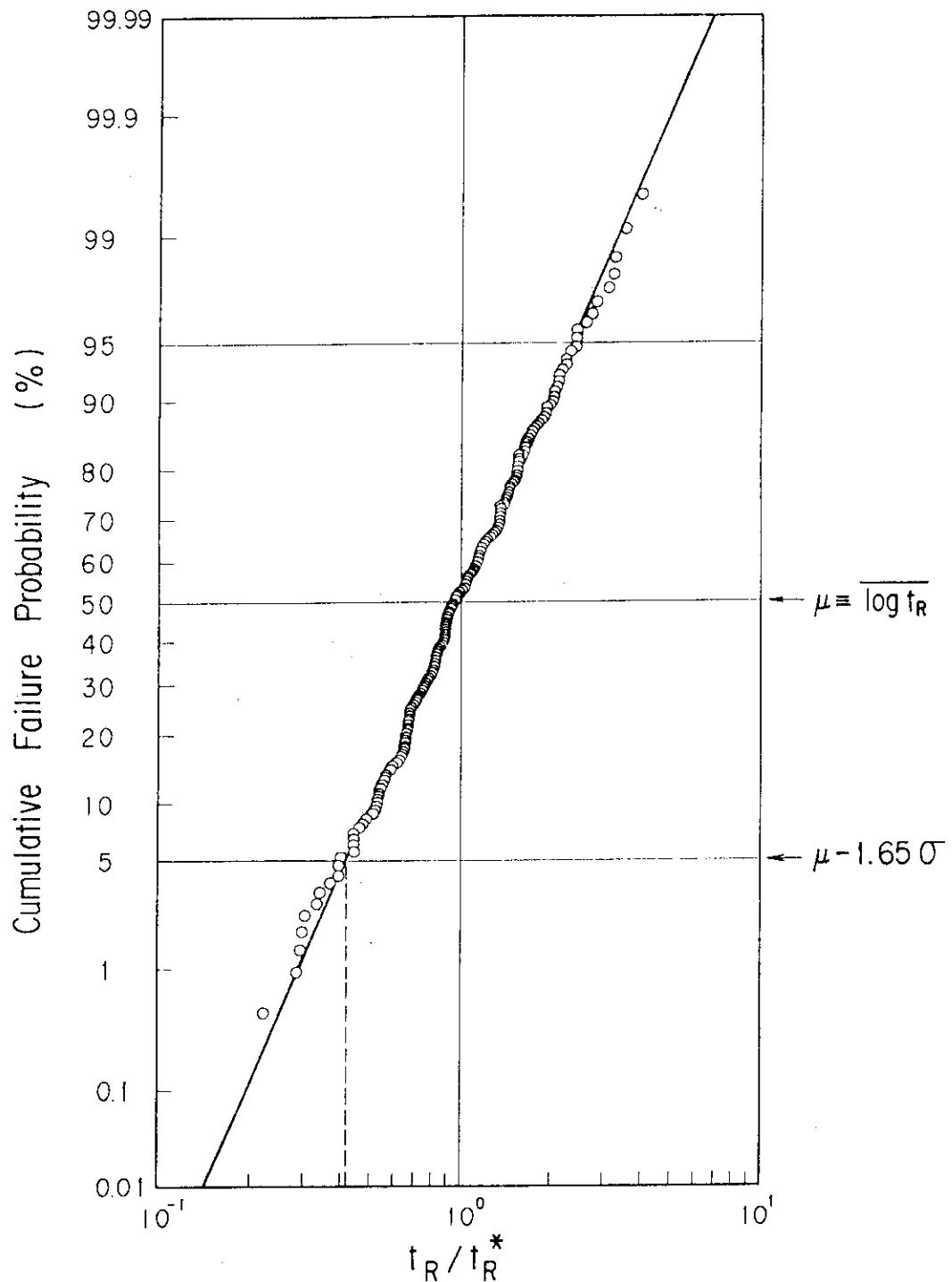


Fig. 3.4.22 Comparison of Estimated Creep Rupture Life by Various Time-Temperature Parameters



t_R : experimental creep rupture life data

t_R^* : predicted by average TTP master curve
 $(\mu \equiv \log t_R = \log t_R^*)$

Fig. 3.4.23 Probabilistic Distribution of Creep Rupture Life Data of Hastelloy XR

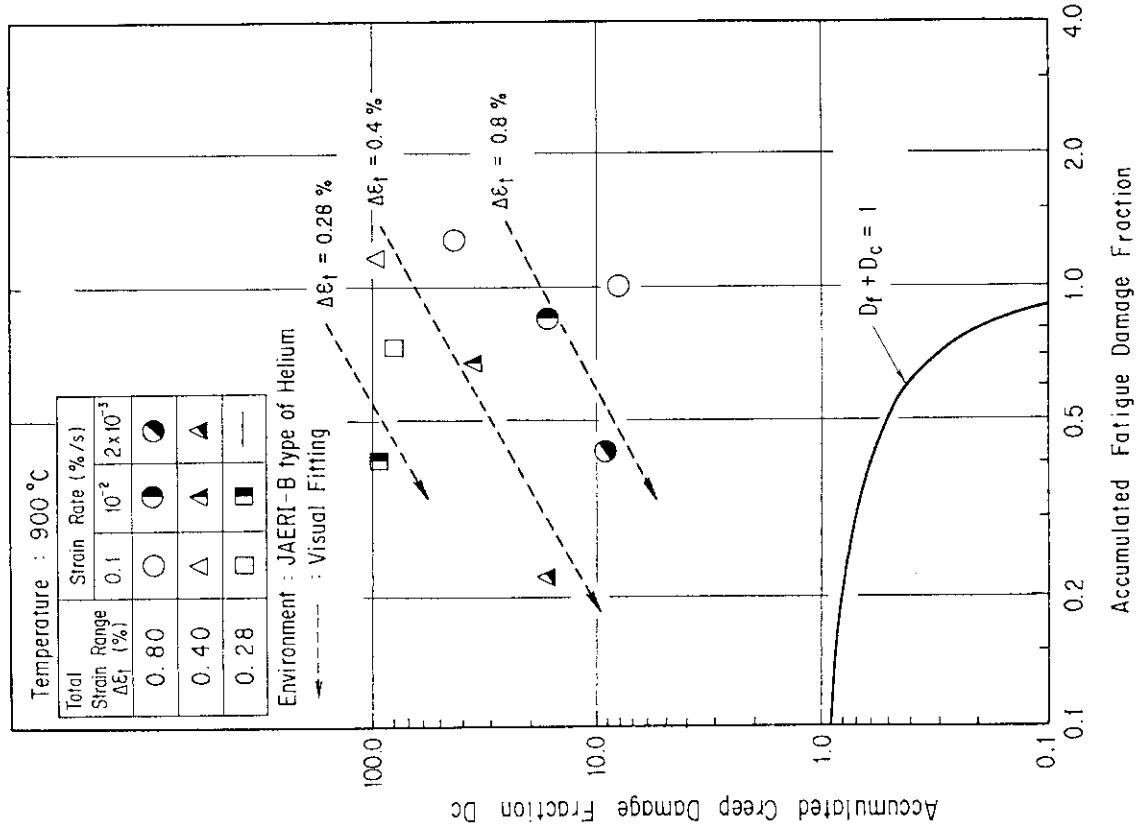


Fig. 3.4.24 Strain Rate Effect on Creep-Fatigue Interaction
for Hastelloy XR(34)

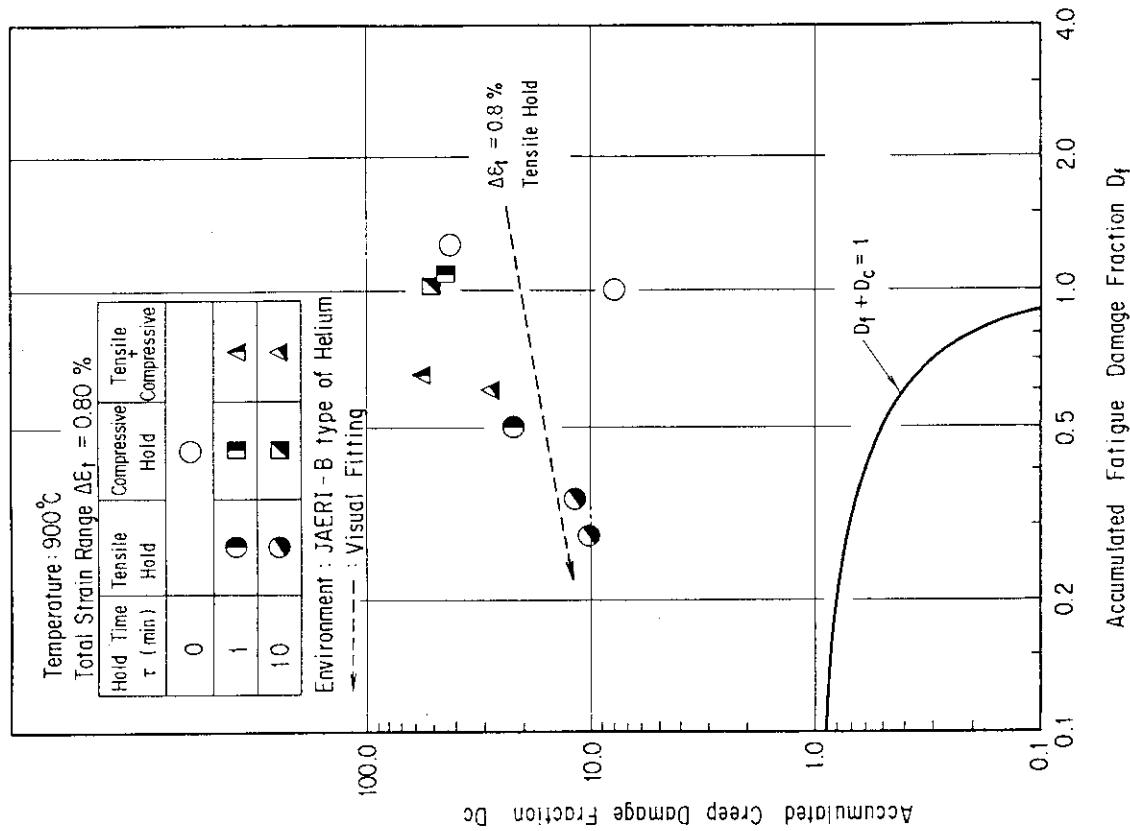


Fig. 3.4.25 Hold Time Effect on Creep-Fatigue Interaction
for Hastelloy XR(34)

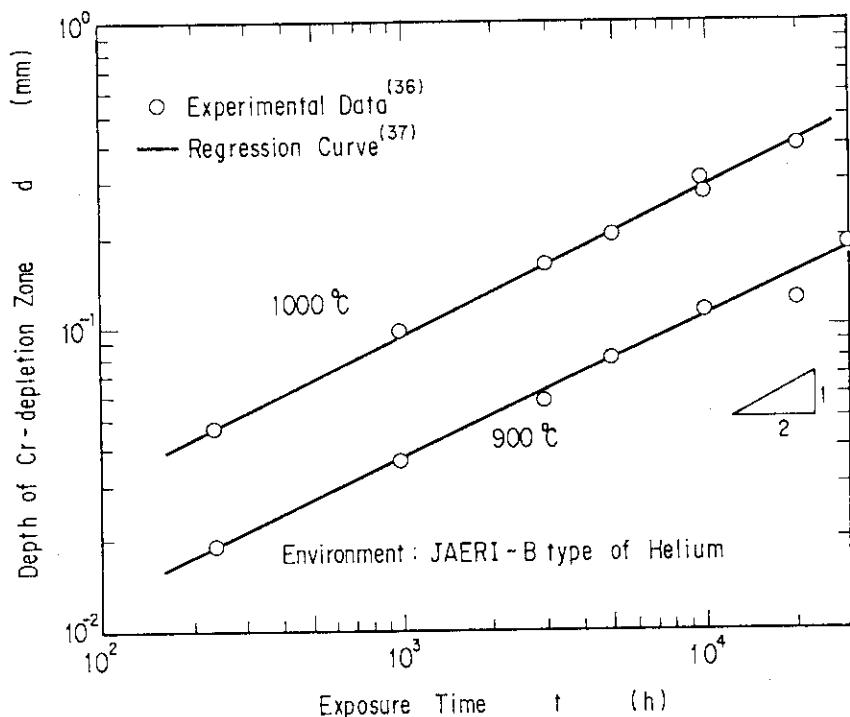


Fig. 3.4.26 Cr-depletion Depth for Hastelloy XR under Helium Environment

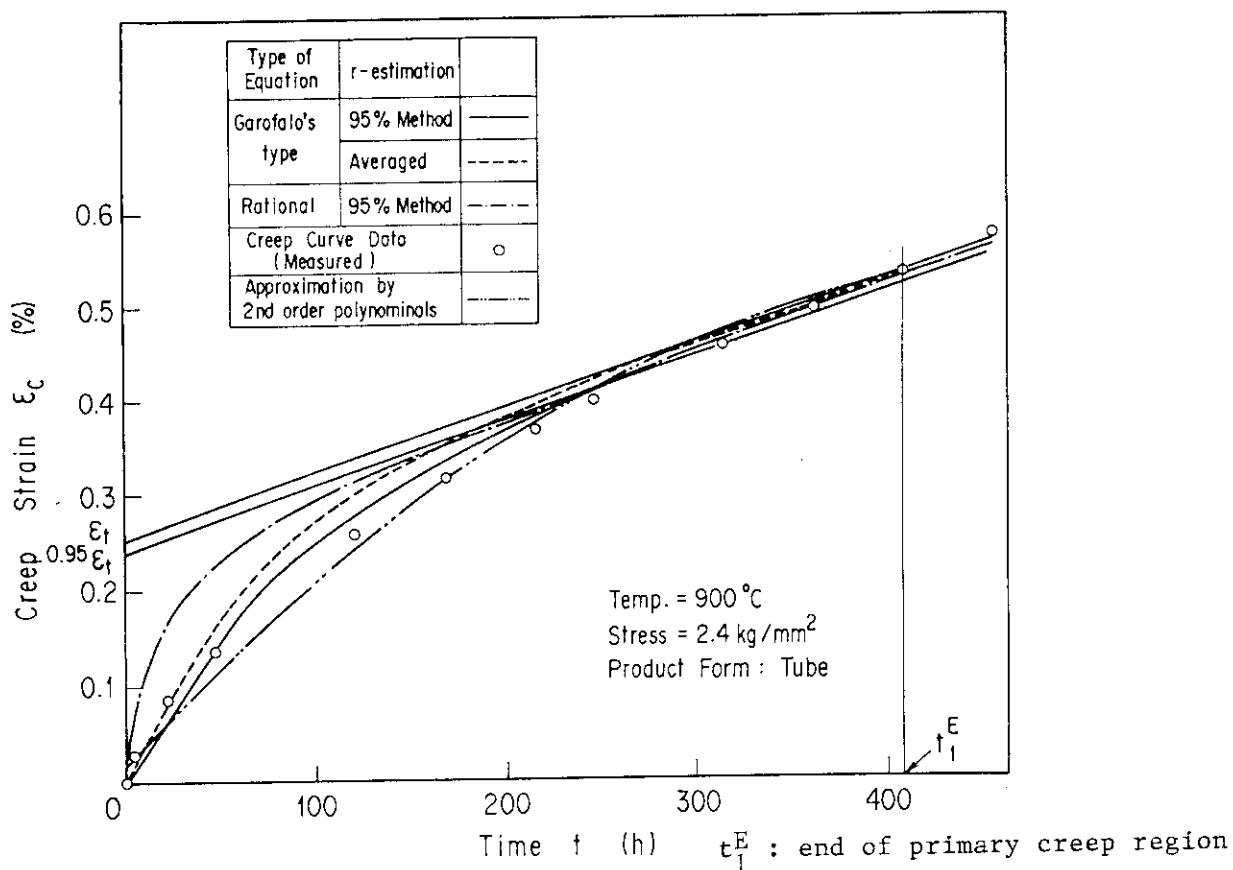


Fig. 3.4.27 Comparison of Various Methods for Estimating r

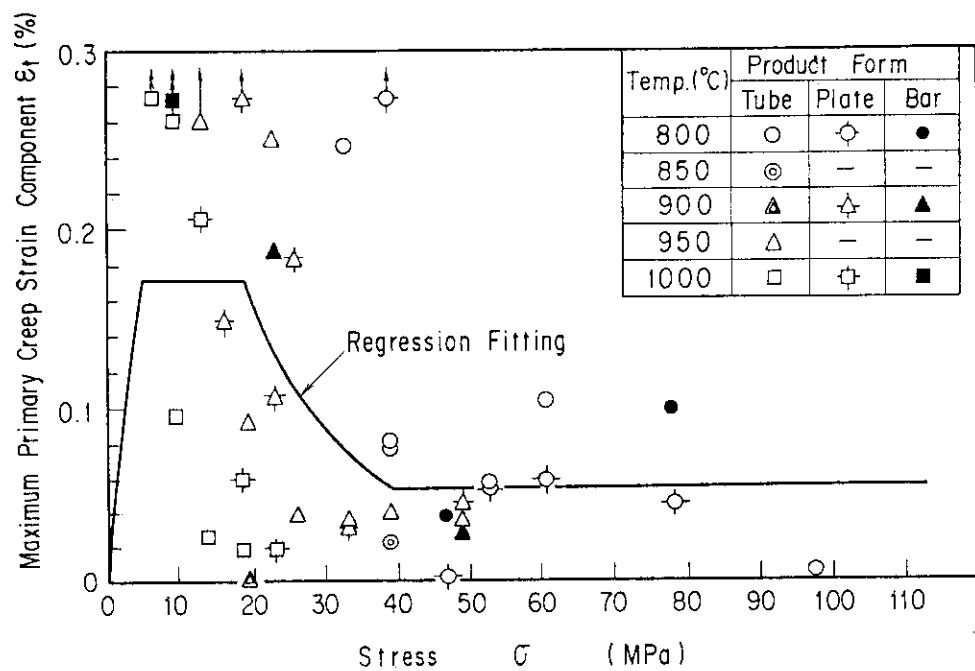


Fig. 3.4.28 Temperature and Stress Dependences of ϵ_t for Hastelloy XR(22)

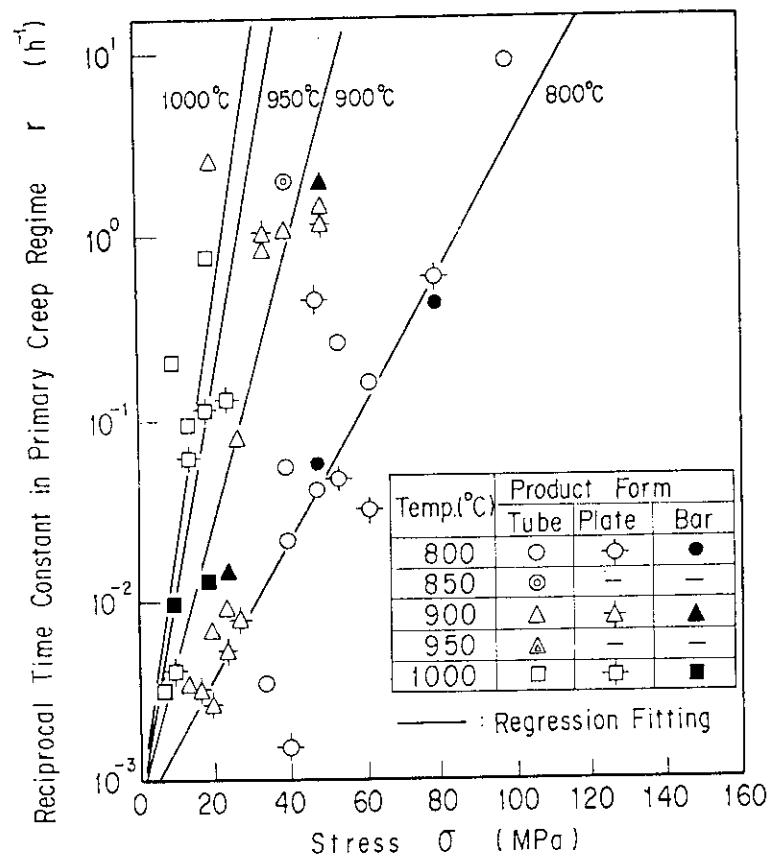


Fig. 3.4.29 Temperature and Stress Dependences of r for Hastelloy XR(22)

4. 材料強度基準等の作成

高温構造設計方針に定めている 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT 材-HTTR 仕様材、オーステナイト系ステンレス鋼の SUS 321 TB 及び SUS 316 並びにハスティロイ XR について、設計応力強さ等の材料強度基準等の作成方法を定めた。

2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT 材-HTTR 仕様材及びオーステナイト系ステンレス鋼については、FBR 方針材料強度基準等を準用することとした。更に、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT 材-HTTR 仕様材は原子炉圧力容器材としても使用することから、中性子照射効果についての評価方法を定め、また、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT 材-HTTR 仕様材及びオーステナイト系ステンレス鋼はともに原子炉冷却材（ヘリウムガス）に接して使用することから、ヘリウム環境効果についての評価方法を定めた。

ハスティロイ XR については、FBR 方針材料強度基準等に含まれていない材料であるため、材料特性を十分に検討し、引張試験方法を見直すとともにクリープ破断データの統計処理方法及びクリープ式の作成方法等を確立したうえで、材料強度基準等の作成方法を定めた。著者らは、これらの作成方法を含め種々の方法で材料強度基準等を作成できるよう、材料試験データをデータベース化し統計処理を行う材料特性データ管理解析コード Data MAC-HTTR (material properties Data Management and Analysis Code for the HTTR) を開発した。ハスティロイ XR の材料強度基準等は、このコードを用いて作成した。

このようにして作成した高温構造設計方針の材料強度基準等を添付して示す。この材料強度基準等に示す材料は、次に定めるとおりである。

2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板 : 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT 材-HTTR 仕様材を含み 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT 材の鋼板 (SCMV 4 2) . 鍛鋼品 (SFVA F 22 B) の材料強度基準等は、本材料のものを準用する。

2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管 : 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT 材-HTTR 仕様材を含み 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の鋼管 (STPA 24) .

ハスティロイ XR : ニッケル基耐食耐熱超合金ハスティロイ XR

SUS 321 伝熱管 : SUS 321TB

SUS 316 : SUS 316

ここで、2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板及び配管としているのは、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT 材-HTTR 仕様材と 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 NT 材の材料強度基準等が異なるので、より汎用な記述としたことによる。また、材料強度基準等の図表は、高温構造設計方針の引用に従って採番している。なお、ハスティロイ XR の長時間クリープ特性に関する材料試験は若干ではあるが現在も継続して実施しているので、ハスティロイ XR の材料強度基準等については、今後若干の見直しを行う予定である。

謝 辞

本材料強度基準等は、各種の材料試験を精力的に実施し貴重なデータを取得された原研及び国内の研究機関等の方々の協力があつてはじめて作成できたものである。これらの試験を遂行された原研の燃料材料工学部の材料応用工学研究室並びに高温工学部の高温材料強度研究室及び高温構造工学研究室、金属材料技術研究所、豊橋科学技術大学、原子力メーカー各社、三菱金属(株)、日本製鋼所、日本钢管(株)等の方々に深甚なる感謝の意を表します。

材料強度基準等の作成にあたっては、財団法人 原子力安全研究協会の「高温ガス炉安全基準調査専門委員会・高温構造設計分科会」において検討をお願いした。この分科会で御指導いただいた矢川元基東大教授をはじめ委員の方々及び事務局の方々に深く感謝するとともに、材料強度基準等の作成に協力いただいた石川島播磨重工業株式会社の笠羽道博氏に感謝いたします。

また、材料試験データ及び各種の情報をご提供いただくとともに有益な御助言を賜った材料応用工学研究室の中島甫室長、辻宏和氏、倉田有司氏及び塙田隆氏、高温材料強度研究室の鈴木雅秀氏、高温構造工学研究室の武藤康室長、研究炉管理部研究炉技術課の古平恒夫課長、東北大学金属材料技術研究所の小川豊氏、金属材料技術研究所第5研究グループの門馬義雄グループリーダー及び環境性能研究部の池田定雄氏、並びに、2 1/4 Cr-1 Mo鋼NT材の材料試験データを快く御提供いただくとともにFBR方針材料強度基準等の作成方法に関して各種の資料をご提供いただいた動力炉・核燃料開発事業团の方々に深甚なる感謝の意を表します。

最後に、本報告書を取り纏めるにあたり、御指導いただき有益な御助言を賜った高温工学試験研究炉開発部の斎藤伸三次長、原子炉建設室の田中利幸室長、HTTR計画室の数土幸夫室長をはじめ高温工学試験研究炉開発部の方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 大洗研究所高温工学試験研究炉設計室他, 「高温工学試験研究炉の高温構造設計方針」, JAERI-M 89-005, 1989年2月.
- 2) 原子力安全研究協会, 非公開資料, 1985年9月.
- 3) 原子力安全研究協会, 非公開資料, 1987年2月.
- 4) 渡辺, 井上, 石油学会誌, 第18巻第9号(1975), p.29.
- 5) 高松, 他3名, 鉄と鋼, 67(1981)1, p.178.
- 6) K. Sahira et al., "Manufacture of a Heat-Resistant Alloy with Modified Specifications for HTGR Structural Applications," Nucl. Technol., Vol 66 (1984), p. 25.
- 7) Society of Automotive Engineers, Aerospace Material Specification (AMS) 5754H, January 1984.
- 8) 動力炉・核燃料開発事業団, 「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」, PNC N 241 84-08(1), 昭和59年9月
- 9) 動力炉・核燃料開発事業団, 「高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準等」, PNC N 241 84-08(2), 昭和59年9月
- 10) A. Yoshitake et al., "A Statistical Study of Creep Rupture and Stress Strain Behavior of Structural Materials under Elevated Temperature Conditions," Proc. Int'l. Conf. Creep, pp. 441 - 446, held in Tokyo, April 14 - 18, 1986.
- 11) 金属材料技術研究所, 「圧力容器用クロムモリブデン鋼SCMV 4 (2.25 Cr - 1 Mo) 高温時間依存低サイクル疲労特性データシート」, 金属材料技術研究所疲労データシートNo.62, 1989.
- 12) 鈴木雅秀(原研), 私信(非公開資料).
- 13) M. Cappelaere et al., Nucl. Technol., vol. 66, Aug. 1984, pp. 465 ~ 478.
- 14) K. Goldmann, "Environmental Design Factors for Sodium-Cooled Fast Reactors Components," IAEA-SM-130/62.
- 15) 古平, 鈴木(原研), 私信(非公開資料).
- 16) JIS G 0567 - 1978, 「鉄鋼材料及び耐熱合金の高温引張試験方法」
- 17) 羽田, 高橋, 元木, 馬場, 「黒鉛減速ヘリウム冷却型原子炉施設に関する構造等の技術基準」, JAERI-M レポートとして公開予定.
- 18) 羽田一彦(原研), 私信(非公開資料).
- 19) 辻宏和(原研), 私信(非公開資料).
- 20) 金属材料技術研究所, 「ボイラ・熱交換器用ステンレス鋼管SUS 321 H TB (18 Cr - 10 Ni - Ti) のクリープデータシート」, 金属材料技術研究所クリープデータシート No. 5 B, 1987.

- 21) 元木保男（原研）, 私信（非公開資料）.
- 22) 横井, 他 4 名, 「ハスティロイ XR のクリープ及び破断挙動の研究－高温構造設計用データとしての評価－（金材技研－原研共同研究）」, JAERI-M 83-138, 1983 年 9 月.
- 23) 倉田, 小川（原研）, 私信（非公開資料）.
- 24) 武藤, 馬場, 羽田（原研）, 私信（非公開資料）.
- 25) 近藤, 日本金属学会報, 第 13 卷 (1974), 第 12 号.
- 26) The American Society of Mechanical Engineers, "Criteria for Design of Elevated Temperature Class 1 Components," ASME, May 1976.
- 27) S.S. Manson, "Fatigue: A Complex Subject—Some Simple Approximations," Report of the National Aeronautics and Space Administration, NASA-TM-X-52084, 1965.
- 28) J.B. Conway et al., "Fatigue, Tensile and Relaxation Behavior of Stainless Steels," TID-26135, 1975.
- 29) 辻和宏（原研）, 私信（非公開資料）.
- 30) H.Tsuji and T.Kondo, "Strain-Time Effects in Low-Cycle Fatigue of Nickel-Base Heat-Resistant Alloys at High Temperatures," J.Nucl.Materials, 150 (1987), pp. 259.
- 31) The American Society of Mechanical Engineers, "The ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III Division 1 Appendix I 1986 Edition Design Stress Intensity Values, Allowable Stresses, Material Properties, and Fatigue Curves," (ASME, New York, 1986).
- 32) 動力炉・核燃料開発事業団, 私信（非公開資料）.
- 33) 野村他 6 名, 「多目的高温ガス実験炉第 1 次高温構造設計指針」, JAERI-M 6396, 1976 年 2 月.
- 34) 辻, 近藤, 「高温ガス炉用 Ni 基耐熱合金の時間依存型高温低サイクル疲労挙動」, JAERI-M 88-099, 1988 年 6 月.
- 35) 動力炉・核燃料開発事業団, 私信（非公開資料）.
- 36) 塚田隆（原研）, 私信（非公開資料）.
- 37) 武藤康（原研）, 私信（非公開資料）.
- 38) F.Garofalo et al., "Strain-Time, Rate-Stress, and Rate-Temperature Relations During Large Deformations in Creep," Joint Intl. Conf. Creep, pp. 1-31 (Institute of Mechanical Engineering, London, 1963).
- 39) M.K. Booker et al., "Mechanical Property Correlations for 2 1/4 Cr-1 Mo Steel in Support of Nuclear Reactor Systems Design," Intl. J. Pressure Vessel and Piping, Vol. 5 (1977), pp. 181-204.

「高温工学試験研究炉高温構造設計方針材料強度基準等」

別表1. 材料強度基準等

	page
別表1.1 最大許容力強さ S_u	
(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板	63
(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管	63
(c) ハステロイ XR	64
(d) SUS 321 伝熱管	65
(e) SUS 316	65
別表1.2 設計応力強さ S_m	
(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板	66
(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管	66
(c) ハステロイ XR	67
(d) SUS 321 伝熱管	68
(e) SUS 316	68
別表1.3 設計応力強さ S_t	
(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板	69
(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管	69
(c) ハステロイ XR	70
(d) SUS 321 伝熱管	71
(e) SUS 316	71
別表1.4 設計降伏点 S_y	
(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板	72
(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管	72
(c) ハステロイ XR	73
(d) SUS 321 伝熱管	74
(e) SUS 316	74
別表1.5 設計クリープ破断応力強さ S_R	
(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板	75
(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管	75
(c) ハステロイ XR	76
(d) SUS 321 伝熱管	77
(e) SUS 316	77
別表1.6 設計引張り強さ S_u	
(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板	78
(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管	78
(c) ハステロイ XR	79
(d) SUS 321 伝熱管	80
(e) SUS 316	80
別表1.7 設計緩和強さ S_r	

(a) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 板	81
(b) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 配管	81
(c) ハステロイ XR	82
(d) SUS 321 伝熱管	83
(e) SUS 316	83
別表 1.8 縦弾性係数 E	
(a) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 板	84
(b) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 配管	84
(c) ハステロイ XR	84
(d) SUS 321 伝熱管	84
(e) SUS 316	84
別表 1.9 ポアソン比 ν	
(a) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 板	84
(b) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 配管	84
(c) ハステロイ XR	84
(d) SUS 321 伝熱管	84
(e) SUS 316	84
別表 1.10 熱膨張係数 α	
(a) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 板	85
(b) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 配管	85
(c) ハステロイ XR	85
(d) SUS 321 伝熱管	85
(e) SUS 316	85
別表 1.11 許容ひずみ範囲 (A) ϵ_t	
(a) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 板	86
(b) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 配管	86
(c) ハステロイ XR	87
(d) SUS 321 伝熱管	88
(e) SUS 316	88
別表 1.12 許容ひずみ範囲 (B) ϵ_t	
(a) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 板	89
(b) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 配管	89
(c) ハステロイ XR	90
(d) SUS 321 伝熱管	91
(e) SUS 316	91
別表 1.13 許容ひずみ範囲 (C) ϵ_t	
(a) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 板	92
(b) 2 1/4 Cr -1 Mo (NT) 配管	92

(c) ハステロイ XR	93
(d) SUS 321 伝熱管	94
(e) SUS 316	94

別図1. 材料強度基準等

別図1.1 最大許容応力強さ S_u

(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板	95
(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管	95
(c) ハステロイ XR	95
(d) SUS 321 伝熱管	95
(e) SUS 316	95

別図1.2 設計応力強さ S_m

(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板	96
(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管	96
(c) ハステロイ XR	96
(d) SUS 321 伝熱管	96
(e) SUS 316	96

別図1.3 設計応力強さ S_t

(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板	97
(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管	98
(c) ハステロイ XR	99
(d) SUS 321 伝熱管	100
(e) SUS 316	101

別図1.4 設計降伏点 S_y

(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板	102
(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管	102
(c) ハステロイ XR	102
(d) SUS 321 伝熱管	102
(e) SUS 316	102

別図1.5 設計クリープ破断応力強さ S_R

(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板	103
(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管	104
(c) ハステロイ XR	105
(d) SUS 321 伝熱管	106
(e) SUS 316	107

別図1.6 設計引張強さ S_u

(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板	108
(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管	108

(c) ハステロイ XR	108
(d) SUS 321 伝熱管	108
(e) SUS 316	108

別図 1.7 設計緩和強さ S_r

(a) 2 1/4 Cr - 1 Mo (NT) 板	109
(b) 2 1/4 Cr - 1 Mo (NT) 配管	110
(c) ハステロイ XR	111
(d) SUS 321 伝熱管	112
(e) SUS 316	113

別図 1.8 許容ひずみ範囲 (A) ϵ_t

(a) 2 1/4 Cr - 1 Mo (NT) 板	114
(b) 2 1/4 Cr - 1 Mo (NT) 配管	114
(c) ハステロイ XR	115
(d) SUS 321 伝熱管	116
(e) SUS 316	116

別図 1.9 訸容ひずみ範囲 (B) ϵ_t

(a) 2 1/4 Cr - 1 Mo (NT) 板	117
(b) 2 1/4 Cr - 1 Mo (NT) 配管	117
(c) ハステロイ XR	118
(d) SUS 321 伝熱管	119
(e) SUS 316	119

別図 1.10 訸容ひずみ範囲 (C) ϵ_t

(a) 2 1/4 Cr - 1 Mo (NT) 板	120
(b) 2 1/4 Cr - 1 Mo (NT) 配管	120
(c) ハステロイ XR	121
(d) SUS 321 伝熱管	122
(e) SUS 316	122

別図 1.11 等時応力-ひずみ線図

(a) 2 1/4 Cr - 1 Mo (NT) 板	123
(b) 2 1/4 Cr - 1 Mo (NT) 配管	131
(c) ハステロイ XR	139
(d) SUS 321 伝熱管	152
(e) SUS 316	162

付 錄

付録MA 環境効果	172
付録MB 設計応力強さ S_t , 設計クリープ破断応力強さ S_R 及び 設計緩和強さ S_r の外挿値	173

付録M C	累積クリープ疲労損傷係数の制限値D	177
付録M D	1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数D*	178
付録M E	ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数D**	189

Supplementary Table 1 Design Allowable Limits

ST1.1 Maximum allowable stress intensity S_o	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	63
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	63
(c) Hastelloy XR	64
(d) SUS321 tube	65
(e) SUS316	65
ST1.2 Allowable stress intensity S_m	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	66
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	66
(c) Hastelloy XR	67
(d) SUS321 tube	68
(e) SUS316	68
ST1.3 Allowable stress intensity S_t	
(a) 2 1/4Cr-Mo(NT) plate	69
(b) 2 1/4Cr-Mo(NT) pipe	69
(c) Hastelloy XR	70
(d) SUS321 tube	71
(e) SUS316	71
ST1.4 Design yield strength S_y	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	72
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	72
(c) Hastelloy XR	73
(d) SUS321 tube	74
(e) SUS316	74
ST1.5 Expected minimum stress-to-rupture S_R	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	75
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	75
(c) Hastelloy XR	76
(d) SUS321 tube	77
(e) SUS316	77
ST1.6 Design ultimate tensile strength S_u	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	78
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	78
(c) Hastelloy XR	79
(d) SUS321 tube	80
(e) SUS316	80

ST1.7 Design relaxation strength S_r	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	81
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	81
(c) Hastelloy XR	82
(d) SUS321 tube	83
(e) SUS316	83
ST1.8 Modulus of elasticity E	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	84
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	84
(c) Hastelloy XR	84
(d) SUS321 tube	84
(e) SUS316	84
ST1.9 Poisson's ratio ν	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	84
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	84
(c) Hastelloy XR	84
(d) SUS321 tube	84
(e) SUS316	84
ST1.10 Mean coefficient of thermal expansion α	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	85
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	85
(c) Hastelloy XR	85
(d) SUS321 tube	85
(e) SUS316	85
ST1.11 Design fatigue strain range (A) ϵ_t	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	86
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	86
(c) Hastelloy XR	87
(d) SUS321 tube	88
(e) SUS316	88
ST1.12 Design fatigue strain range (B) ϵ_t	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	89
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	89
(c) Hastelloy Xr	90
(d) SUS321 tube	91
(e) SUS316	91

ST1.13 Design fatigue strain range (ϵ_f) ϵ_t	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	92
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	92
(c) Hastelloy XR	93
(d) SUS321 tube	94
(e) SUS316	94

Supplementary Figure 1 Design Allowable Limits

SF1.1 Maximum allowable stress intensity S_o	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	95
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	95
(c) Hastelloy XR	95
(d) SUS321 tube	95
(e) SUS316	95
SF1.2 Allowable stress intensity S_m	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	96
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	96
(c) Hastelloy XR	96
(d) SUS321 tube	96
(e) SUS316	96
SF1.3 Allowable stress intensity S_t	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	97
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	98
(c) Hastelloy XR	99
(d) SUS321 tube	100
(e) SUS316	101
SF1.4 Design yield strength S_y	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	102
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	102
(c) Hastelloy XR	102
(d) SUS321 tube	102
(e) SUS316	102
SF1.5 Expected minimum stress-to-rupture S_R	
(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	103
(b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	104
(c) Hastelloy XR	105
(d) SUS321 tube	106
(e) SUS316	107

SF1.6	Design ultimate tensile strength S_u	
(a)	2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	108
(b)	2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	108
(c)	Hastelloy XR	108
(d)	SUS321 tube	108
(e)	SUS316	108
SF1.7	Design relaxation strength S_r	
(a)	2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	109
(b)	2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	110
(c)	Hastelloy XR	111
(d)	SUS321 tube	112
(e)	SUS316	113
SF1.8	Design fatigue strain range (A) ϵ_t	
(a)	2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	114
(b)	2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	114
(c)	Hastelloy XR	115
(d)	SUS321 tube	116
(e)	SUS316	116
SF1.9	Design fatigue strain range (B) ϵ_t	
(a)	2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	117
(b)	2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	117
(c)	Hastelloy XR	118
(d)	SUS321 tube	119
(e)	SUS316	119
SF1.10	Design fatigue strain range (C) ϵ_t	
(a)	2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	120
(b)	2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	120
(c)	Hastelloy XR	121
(d)	SUS321 tube	122
(e)	SUS316	122
SF1.11	Isochronous stress-strain curve	
(a)	2 1/4Cr-1Mo(NT) plate	123
(b)	2 1/4Cr-1Mo(NT) pipe	131
(c)	Hastelloy XR	139
(d)	SUS321 tube	152
(e)	SUS316	162

Appendices

Appendix MA	Environmental effects	172
Appendix MB	Extrapolated values of allowable intensity value S_t , expected minimum stress-to-rupture S_R and design relaxation strength S_r	173
Appendix MC	Total creep-fatigue Damage D	177
Appendix MD	Creep damage during relaxation of primary and secondary stresses D^*	178
Appendix ME	Creep damage during relaxation of peak stress D^{**} ..	179

別表 1.1-(a), (b) 2 1/4 Cr-1 Mo(NT) 板及び配管の最大許容応力強さ S_o (kg/mm²)

温 度 °C	2 1/4 Cr-1 Mo(NT) 板	2 1/4 Cr-1 Mo(NT) 配管
-30 ~ 40	1 3. 2	1 0. 5
75	1 3. 1	1 0. 5
100	1 3. 0	1 0. 5
150	1 2. 6	1 0. 5
200	1 2. 3	1 0. 5
225	1 2. 2	1 0. 5
250	1 2. 1	1 0. 5
275	1 2. 1	1 0. 5
300	1 2. 1	1 0. 5
325	1 2. 1	1 0. 5
350	1 2. 1	1 0. 5
375	1 2. 0	1 0. 5
400	1 1. 9	1 0. 5
425	1 1. 8	1 0. 5
450	1 1. 5	1 0. 2
475	1 0. 6	9. 4
500	8. 7	8. 3
525	6. 5	6. 5
550	4. 9	4. 9

別表 1.1-(c) ハステロイ XR の最大許容応力強さ S_o (kg/mm²)

温 度 ℃	ハステロイ XR
-30 ~ 40	14.0
75	14.0
100	14.0
150	13.6
200	13.2
250	12.9
300	12.8
350	12.6
400	12.4
450	12.2
500	12.0
550	11.6
600	9.0
650	5.5
700	3.4
750	2.0
800	1.1
850	0.62
900	0.34
950	0.19
1000	0.13

別表 1.1-(d), (e) SUS 321 伝熱管及びSUS 316 の最大許容応力強さ S_o (kg/mm²)

温 度 °C	S U S 3 2 1 伝 热 管	S U S 3 1 6
- 3 0 ~ 4 0	1 3. 2	1 3. 2
7 5	1 3. 0	1 3. 2
1 0 0	1 2. 8	1 3. 2
1 5 0	1 2. 2	1 2. 9
2 0 0	1 2. 0	1 2. 9
2 2 5	1 2. 0	1 2. 7
2 5 0	1 2. 0	1 2. 7
2 7 5	1 1. 9	1 2. 5
3 0 0	1 1. 7	1 2. 1
3 2 5	1 1. 5	1 1. 9
3 5 0	1 1. 3	1 1. 7
3 7 5	1 1. 1	1 1. 4
4 0 0	1 1. 0	1 1. 3
4 2 5	1 0. 9	1 1. 2
4 5 0	1 0. 5	1 1. 1
4 7 5	1 0. 1	1 0. 9
5 0 0	1 0. 0	1 0. 9
5 2 5	9. 8	1 0. 9
5 5 0	9. 6	1 0. 5
5 7 5	8. 2	9. 7
6 0 0	5. 7	8. 3
6 2 5	3. 3	6. 7
6 5 0	—	5. 1

別表 1.2-(a), (b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) 板及び配管の設計応力強さ S_m (kg/mm²)

温 度 °C	2 1/4Cr-1Mo(NT) 板	2 1/4Cr-1Mo(NT) 配管
-30 ~ 40	1 7. 7	1 4. 0
75	1 5. 9	1 2. 7
100	1 5. 8	1 2. 7
150	1 5. 2	1 2. 6
200	1 4. 9	1 2. 4
225	1 4. 8	1 2. 4
250	1 4. 7	1 2. 4
275	1 4. 7	1 2. 4
300	1 4. 7	1 2. 4
325	1 4. 7	1 2. 4
350	1 4. 6	1 2. 4
375	1 4. 6	1 2. 4
400	1 4. 5	1 2. 4
425	1 4. 3	1 2. 4
450	1 3. 8	1 2. 1
475	1 3. 3	1 1. 8
500	1 2. 5	1 1. 5
525	1 1. 5	1 0. 9
550	1 0. 4	1 0. 2

別表 1.2-(c) ハステロイ XR の設計応力強さ S_m (kg/mm²)

温 度 ℃	ハステロイ XR
-30 ~ 40	14.9
75	14.9
100	14.9
150	14.9
200	14.9
250	14.9
300	14.0
350	14.0
400	13.1
450	13.1
500	12.8
550	12.3
600	12.3
650	12.3
700	12.3
750	12.1
800	10.6
850	10.4
900	9.4
950	7.9
1000	6.4

別表 1.2-(d), (e) SUS 321 伝熱管及びSUS 316 の設計応力強さ S_m (kg/mm²)

温 度 ℃	S U S 3 2 1 伝熱管	S U S 3 1 6
-30 ~ 40	1 4. 0	1 4. 0
7 5	1 4. 0	1 4. 0
1 0 0	1 4. 0	1 4. 0
1 5 0	1 4. 0	1 4. 0
2 0 0	1 3. 1	1 3. 5
2 2 5	1 2. 7	1 3. 2
2 5 0	1 2. 2	1 2. 8
2 7 5	1 2. 0	1 2. 4
3 0 0	1 1. 7	1 2. 1
3 2 5	1 1. 4	1 1. 9
3 5 0	1 1. 3	1 1. 6
3 7 5	1 1. 1	1 1. 4
4 0 0	1 1. 0	1 1. 2
4 2 5	1 0. 9	1 1. 1
4 5 0	1 0. 9	1 0. 9
4 7 5	1 0. 9	1 0. 7
5 0 0	1 0. 9	1 0. 6
5 2 5	1 0. 8	1 0. 4
5 5 0	1 0. 7	1 0. 3
5 7 5	1 0. 5	1 0. 2
6 0 0	1 0. 4	1 0. 0
6 2 5	1 0. 3	9. 8
6 5 0	1 0. 1	9. 6

別表 1.3-(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板の設計応力強さ S_t (kg/mm^2)

時間 h °C 温度	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
375	29.1	29.0	29.0	28.9	28.6	25.9	23.6	21.3	19.3	17.3	15.5
400	28.7	28.5	28.5	27.3	24.8	22.3	20.2	18.0	16.1	14.3	12.7
425	28.2	27.9	26.4	23.7	21.4	19.0	17.1	15.0	13.3	11.6	10.2
450	27.2	25.6	23.0	20.5	18.3	16.1	14.3	12.4	10.9	9.3	8.0
475	26.0	22.3	19.9	17.5	15.5	13.5	11.8	10.1	8.7	7.3	6.1
500	24.4	19.4	17.1	14.9	13.0	11.2	9.6	8.1	6.8	5.5	4.4
525	21.6	16.7	14.6	12.5	10.8	9.1	7.7	6.3	5.1	3.8	—
550	18.9	14.3	12.3	10.4	8.8	7.3	6.0	4.7	3.5	—	—

(備考) 許容時間 (h) を定めるべき応力値 (kg/mm^2) が当該温度 (°C) における表中の応力値よりも小さい場合は付録MBを用いて定めることができる。

別表 1.3-(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管の設計応力強さ S_t (kg/mm^2)

時間 h °C 温度	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
375	23.7	23.6	23.6	23.5	23.5	23.5	23.4	21.3	19.3	17.3	15.5
400	23.5	23.4	23.3	23.3	23.2	22.3	20.2	18.0	16.1	14.3	12.7
425	23.3	23.1	23.0	22.9	21.4	19.0	17.1	15.0	13.3	11.6	10.2
450	22.4	22.2	22.0	20.5	18.3	16.1	14.3	12.4	10.9	9.3	8.0
475	21.6	21.1	19.9	17.5	15.5	13.5	11.8	10.1	8.7	7.3	6.1
500	20.7	19.4	17.1	14.9	13.0	11.2	9.6	8.1	6.8	5.5	4.4
525	19.6	16.7	14.6	12.5	10.8	9.1	7.7	6.3	5.1	3.8	—
550	18.1	14.3	12.3	10.4	8.8	7.3	6.0	4.7	3.5	—	—

(備考) 許容時間 (h) を定めるべき応力値 (kg/mm^2) が当該温度 (°C) における表中の応力値よりも小さい場合は付録MBを用いて定めることができる。

別表 1.3(c) ハスチロイ XR の設計応力強さ S_t (kg/mm²)

$^{\circ}\text{C}$ 温度 \ 時間 h	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5
425	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5
450	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	29.7
500	30.1	30.1	30.1	30.1	30.1	30.1	27.6	24.6	22.1	19.6
550	28.8	28.8	28.8	26.6	24.0	21.3	19.1	16.9	14.5	12.2
600	27.4	24.1	21.7	19.2	17.1	15.0	12.9	10.7	9.1	7.5
650	22.6	17.9	15.9	13.9	11.9	9.9	8.3	6.9	5.7	4.5
700	17.2	13.4	11.5	9.6	8.1	6.6	5.5	4.3	3.5	2.7
750	13.2	9.6	8.1	6.7	5.5	4.4	3.5	2.7	2.1	1.5
800	9.4	6.9	5.7	4.6	3.7	2.8	2.2	1.6	1.2	0.82
850	7.4	4.9	4.0	3.1	2.5	1.8	1.4	0.95	0.65	0.39
900	5.5	3.5	2.8	2.1	1.6	1.1	0.80	0.50	0.29	0.15
950	4.1	2.5	1.9	1.4	1.0	0.67	0.39	0.21	0.12	0.065
1000	3.2	1.9	1.4	0.98	0.68	0.36	0.21	0.11	0.063	0.034

(備考) 許容時間 (h) を定めるべき応力値 (kg/mm²) が当該温度 (°C) における表中の応力値よりも小さい場合は付録MBを用いて定めることができる。

別表 1.3-(d) SUS 321伝熱管の設計応力強さ S_t (kg/mm^2)

時間 h 温度°C	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.4	16.3	16.3	16.3	16.3
450	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	16.2	16.2	16.2	16.1
475	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.1	16.0	15.9	15.8
500	16.2	16.2	16.2	16.1	16.1	16.1	16.0	15.9	15.8	14.8	12.8
525	16.0	16.0	16.0	15.9	15.9	15.8	15.7	15.5	14.0	11.8	10.0
550	15.8	15.8	15.8	15.7	15.6	15.4	15.3	13.1	11.1	9.1	7.5
575	15.6	15.5	15.4	15.3	15.1	14.8	12.6	10.4	8.6	6.8	5.3
600	15.4	15.2	15.1	14.9	14.5	12.1	10.1	8.1	6.4	4.6	—
625	15.1	14.8	14.6	14.1	11.9	9.6	7.8	5.9	4.4	—	—
650	14.7	14.3	13.9	11.6	9.5	7.4	5.7	4.0	—	—	—

(備考) 許容時間 (h) を定めるべき応力値 (kg/mm^2) が当該温度 (°C) における表中の応力値よりも小さい場合は付録MBを用いて定めることができる。

別表 1.3-(e) SUS 316の設計応力強さ S_t (kg/mm^2)

時間 h 温度°C	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2
450	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9
475	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.6	14.6	14.6	14.5
500	14.6	14.6	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.4	14.3	14.2	12.6
525	14.3	14.3	14.3	14.3	14.2	14.2	14.1	13.9	13.5	11.6	10.0
550	14.1	14.1	14.0	13.9	13.8	13.6	13.3	12.7	11.0	9.3	7.9
575	13.9	13.8	13.7	13.5	13.2	12.7	12.2	10.3	8.8	7.3	6.1
600	13.7	13.3	13.1	12.6	11.9	10.9	9.9	8.2	6.9	5.6	4.5
625	13.3	12.6	12.0	10.9	9.7	8.2	6.8	5.5	4.4	3.4	2.5
650	12.6	11.2	10.0	8.4	6.9	5.4	4.2	3.1	2.2	1.3	—

(備考) 許容時間 (h) を定めるべき応力値 (kg/mm^2) が当該温度 (°C) における表中の応力値よりも小さい場合は付録MBを用いて定めることができる。

別表 1.4-(a), (b) 2 1/4Cr-1Mo(NT) 板及び配管の設計降伏点 S_y (kg/mm²)

温 度 ℃	2 1/4Cr-1Mo(NT) 板	2 1/4Cr-1Mo(NT) 配管
-30 ~ 40	3 2. 0	2 1. 0
7 5	2 8. 9	2 0. 1
1 0 0	2 7. 4	1 9. 5
1 5 0	2 6. 0	1 9. 0
2 0 0	2 5. 0	1 8. 9
2 2 5	2 4. 8	1 8. 8
2 5 0	2 4. 7	1 8. 8
2 7 5	2 4. 6	1 8. 8
3 0 0	2 4. 6	1 8. 8
3 2 5	2 4. 5	1 8. 8
3 5 0	2 4. 5	1 8. 8
3 7 5	2 4. 4	1 8. 8
4 0 0	2 4. 2	1 8. 8
4 2 5	2 3. 9	1 8. 8
4 5 0	2 3. 3	1 8. 2
4 7 5	2 2. 6	1 7. 7
5 0 0	2 1. 7	1 7. 3
5 2 5	2 1. 0	1 6. 9
5 5 0	2 0. 0	1 6. 5

別表1.4-(c) ハスティロイXRの設計降伏点 $S_y (\text{kg/mm}^2)$

温 度 °C	ハスティロイ XR
-30 ~ 40	22.4
75	20.1
100	19.8
150	18.4
200	16.7
250	16.6
300	15.5
350	15.5
400	14.5
450	14.5
500	14.2
550	13.7
600	13.7
650	13.7
700	13.7
750	13.7
800	12.8
850	12.4
900	11.7
950	11.7
1000	11.5

別表 1.4-(d), (e) SUS 321 伝熱管及びSUS 316 の設計降伏点 S_y (kg/mm²)

温 度 ℃	S U S 3 2 1 伝熱管	S U S 3 1 6
- 3 0 ~ 4 0	2 1. 0	2 1. 0
7 5	1 8. 9	1 9. 1
1 0 0	1 7. 6	1 7. 9
1 5 0	1 5. 9	1 6. 4
2 0 0	1 4. 6	1 5. 2
2 2 5	1 4. 1	1 4. 7
2 5 0	1 3. 6	1 4. 2
2 7 5	1 3. 3	1 3. 8
3 0 0	1 3. 0	1 3. 4
3 2 5	1 2. 7	1 3. 1
3 5 0	1 2. 5	1 2. 9
3 7 5	1 2. 3	1 2. 7
4 0 0	1 2. 2	1 2. 5
4 2 5	1 2. 1	1 2. 4
4 5 0	1 2. 1	1 2. 1
4 7 5	1 2. 1	1 1. 9
5 0 0	1 2. 1	1 1. 8
5 2 5	1 2. 0	1 1. 6
5 5 0	1 1. 9	1 1. 4
5 7 5	1 1. 7	1 1. 3
6 0 0	1 1. 6	1 1. 1
6 2 5	1 1. 4	1 0. 9
6 5 0	1 1. 2	1 0. 7

別表 1.5 -(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板の設計クリープ破断応力強さ S_R (kg/mm²)

時間 h °C 温度	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
375	43.8	43.8	43.8	43.8	43.0	38.9	35.5	31.9	28.9	25.9	23.3
400	43.6	43.6	43.6	41.0	37.3	33.5	30.2	27.0	24.2	21.4	19.0
425	42.9	42.9	39.7	35.6	32.1	28.6	25.6	22.6	20.0	17.4	15.3
450	41.5	38.3	34.5	30.7	27.5	24.2	21.4	18.6	16.3	13.9	12.0
475	39.8	33.5	29.9	26.3	23.3	20.2	17.7	15.2	13.0	10.9	9.1
500	36.9	29.0	25.7	22.3	19.6	16.8	14.4	12.1	10.2	8.2	6.7
525	32.4	25.0	21.9	18.8	16.2	13.6	11.5	9.4	7.7	5.9	4.5
550	28.3	21.4	18.5	15.6	13.2	10.9	9.0	7.0	5.5	3.9	—

(備考) 許容時間 (h) を定めるべき応力値 (kg/mm²) が当該温度 (°C) における表中の応力値よりも小さい場合は付録MBを用いて定めることができる。

別表 1.5 -(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管の設計クリープ破断応力強さ S_R (kg/mm²)

時間 h °C 温度	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
375	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	35.5	31.9	28.9	25.9	23.3
400	37.2	37.2	37.2	37.2	37.2	33.5	30.2	27.0	24.2	21.4	19.0
425	37.2	37.2	37.2	35.6	32.1	28.6	25.6	22.6	20.0	17.4	15.3
450	37.2	37.2	34.5	30.7	27.5	24.2	21.4	18.6	16.3	13.9	12.0
475	37.2	33.5	29.9	26.3	23.3	20.2	17.7	15.2	13.0	10.9	9.1
500	35.1	29.0	25.7	22.3	19.6	16.8	14.4	12.1	10.2	8.2	6.7
525	32.4	25.0	21.9	18.8	16.2	13.6	11.5	9.4	7.7	5.9	4.5
550	28.3	21.4	18.5	15.6	13.2	10.9	9.0	7.0	5.5	3.9	—

(備考) 許容時間 (h) を定めるべき応力値 (kg/mm²) が当該温度 (°C) における表中の応力値よりも小さい場合は付録MBを用いて定めることができる。

別表 1.5-(c) ハステロイ X R の設計クリープ破断応力強さ S_R (kg/mm²)

$\frac{\text{時間}}{\text{温度}}$	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5
425	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2	49.2
450	48.8	48.8	48.8	48.8	48.8	48.8	48.8	48.8	48.8	48.8
500	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	47.4	40.8	35.4	30.2
550	46.5	46.5	46.5	46.4	40.4	34.6	29.9	25.4	21.8	18.3
600	46.0	46.0	36.2	30.9	26.7	22.5	19.3	16.1	13.6	11.2
650	39.0	28.9	24.8	20.9	17.8	14.9	12.5	10.3	8.5	6.9
700	28.0	20.3	17.3	14.4	12.1	9.9	8.2	6.6	5.4	4.2
750	20.3	14.4	12.1	10.0	8.2	6.6	5.4	4.2	3.3	2.5
800	14.1	10.4	8.6	6.9	5.6	4.4	3.5	2.7	2.0	1.4
850	11.1	7.5	6.1	4.8	3.8	2.9	2.3	1.6	1.2	0.77
900	8.3	5.4	4.3	3.4	2.6	1.9	1.4	0.94	0.64	0.42
950	6.2	3.9	3.1	2.3	1.7	1.2	0.82	0.54	0.37	0.24
1000	4.7	2.8	2.2	1.6	1.1	0.78	0.49	0.32	0.22	0.14

(備考) 許容時間 (h) を定めるべき応力値 (kg/mm²) が当該温度 (°C) における表中の応力値よりも小さい場合は付録MBを用いて定めることができる。

別表 1.5-(d) SUS 321伝熱管の設計クリープ破断応力強さ S_R (kg/mm²)

時間 h 温度°C	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	39.4	35.5
450	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	37.2	33.0	29.4
475	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	39.6	35.0	31.2	27.2	23.9
500	39.9	39.9	39.9	39.9	39.9	37.8	33.6	29.3	25.8	22.2	19.2
525	39.3	39.3	39.3	39.3	36.7	32.0	28.1	24.2	21.0	17.7	14.9
550	38.4	38.4	38.4	35.4	31.2	26.9	23.3	19.7	16.7	13.7	11.2
575	37.2	37.2	35.0	30.2	26.2	22.3	19.0	15.7	12.9	10.2	7.9
600	35.8	34.3	29.9	25.5	21.8	18.1	15.1	12.1	9.6	7.1	4.9
625	34.1	29.4	25.3	21.2	17.8	14.5	11.7	8.9	6.6	4.1	—
650	32.1	25.0	21.2	17.4	14.3	11.2	8.6	6.0	—	—	—

(備考) 許容時間 (h) を定めるべき応力値 (kg/mm²) が当該温度 (°C) における表中の応力値よりも小さい場合は付録MBを用いて定めることができる。

別表 1.5-(e) SUS 316 の設計クリープ破断応力強さ S_R (kg/mm²)

時間 h 温度°C	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	42.4	38.0	34.3
450	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	39.6	35.7	31.7	28.4
475	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	41.9	37.7	33.4	29.8	26.3	23.3
500	43.0	43.0	43.0	43.0	40.3	35.7	31.8	27.9	24.7	21.5	18.9
525	42.1	42.1	42.1	38.7	34.4	30.2	26.7	23.2	20.3	17.4	15.1
550	40.9	40.9	37.7	33.1	29.2	25.3	22.2	19.0	16.4	13.9	11.8
575	39.4	36.7	32.4	28.1	24.6	21.1	18.2	15.4	13.1	10.9	9.1
600	37.5	31.6	27.6	23.7	20.5	17.4	14.8	12.3	10.3	8.3	6.8
625	35.3	27.0	23.4	19.9	17.0	14.1	11.9	9.7	7.9	6.2	4.8
650	31.1	23.0	19.7	16.4	13.9	11.3	9.3	7.4	5.8	4.4	3.2

(備考) 許容時間 (h) を定めるべき応力値 (kg/mm²) が当該温度 (°C) における表中の応力値よりも小さい場合は付録MBを用いて定めることができる。

別表 1.6-(a), (b) 2 1/4Cr-1Mo(NT)板及び配管の設計引張強さ S_u (kg/mm²)

温 度 ℃	2 1/4Cr-1Mo(NT) 板	2 1/4Cr-1Mo(NT) 配管
-30 ~ 40	5 3. 0	4 2. 0
7 5	4 7. 7	3 8. 2
1 0 0	4 7. 4	3 8. 2
1 5 0	4 5. 7	3 7. 7
2 0 0	4 4. 6	3 7. 2
2 2 5	4 4. 4	3 7. 2
2 5 0	4 4. 1	3 7. 2
2 7 5	4 4. 0	3 7. 2
3 0 0	4 4. 0	3 7. 2
3 2 5	4 4. 0	3 7. 2
3 5 0	4 3. 9	3 7. 2
3 7 5	4 3. 8	3 7. 2
4 0 0	4 3. 6	3 7. 2
4 2 5	4 2. 9	3 7. 2
4 5 0	4 1. 5	3 7. 2
4 7 5	3 9. 8	3 7. 2
5 0 0	3 7. 5	3 5. 1
5 2 5	3 4. 5	3 2. 8
5 5 0	3 1. 1	3 0. 5

別表1.6-(c) ハステロイXRの設計引張強さ S_u (kg/mm²)

温 度 ℃	ハステロイ XR
-30 ~ 40	60.8
75	57.0
100	55.9
150	54.2
200	52.9
250	51.5
300	51.0
350	50.5
400	49.6
450	48.8
500	48.0
550	46.5
600	46.0
650	44.9
700	40.6
750	36.4
800	31.7
850	31.3
900	28.1
950	23.6
1000	19.3

別表 1.6-(d), (e) SUS 321 伝熱管及びSUS 316 の設計引張強さ S_u (kg/mm²)

温 度 ℃	S U S 3 2 1 伝熱管	S U S 3 1 6
- 3 0 ~ 4 0	5 3. 0	5 3. 0
7 5	4 7. 8	4 9. 9
1 0 0	4 5. 5	4 8. 5
1 5 0	4 3. 8	4 5. 1
2 0 0	4 2. 0	4 4. 9
2 2 5	4 1. 6	4 4. 5
2 5 0	4 1. 2	4 4. 1
2 7 5	4 0. 7	4 3. 8
3 0 0	4 0. 3	4 3. 5
3 2 5	4 0. 3	4 3. 5
3 5 0	4 0. 3	4 3. 5
3 7 5	4 0. 3	4 3. 5
4 0 0	4 0. 3	4 3. 5
4 2 5	4 0. 3	4 3. 5
4 5 0	4 0. 3	4 3. 5
4 7 5	4 0. 3	4 3. 5
5 0 0	3 9. 9	4 3. 0
5 2 5	3 9. 3	4 2. 1
5 5 0	3 8. 4	4 0. 9
5 7 5	3 7. 2	3 9. 4
6 0 0	3 5. 8	3 7. 5
6 2 5	3 4. 1	3 5. 3
6 5 0	3 2. 1	3 2. 8

別表 1.7-(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板の設計緩和強さ S_r (kg/mm²)

時間 h °C 温度	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
375	21.8	21.4	20.6	19.3	18.2	17.7	17.5	16.9	16.0	14.7	13.7
400	21.5	20.2	18.8	17.2	16.5	16.1	15.5	14.3	13.0	11.8	10.9
425	20.8	18.1	16.3	15.1	14.6	13.9	12.8	11.3	10.0	8.9	8.1
450	19.1	15.3	13.7	12.7	12.1	11.1	9.8	8.3	7.1	6.1	5.3
475	16.9	12.6	11.2	10.4	9.6	8.4	7.0	5.6	4.5	3.6	2.9
500	14.2	9.9	8.7	7.9	7.0	5.7	4.5	3.2	2.1	—	—
525	11.4	7.3	6.2	5.5	4.6	3.4	2.1	—	—	—	—
550	8.7	4.9	3.9	3.2	2.4	0.9	—	—	—	—	—

別表 1.7-(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管の設計緩和強さ S_r (kg/mm²)

時間 h °C 温度	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
375	18.6	18.4	18.1	17.2	16.1	15.2	14.9	14.7	14.3	13.4	12.4
400	18.5	17.9	16.9	15.5	14.3	13.8	13.6	13.0	12.0	10.8	9.7
425	18.3	16.6	15.0	13.5	12.7	12.3	11.7	10.6	9.3	8.1	7.2
450	17.3	14.3	12.6	11.3	10.8	10.2	9.2	7.8	6.6	5.5	4.7
475	15.8	11.9	10.3	9.3	8.8	7.8	6.7	5.3	4.2	3.1	2.4
500	13.7	9.4	8.1	7.3	6.6	5.5	4.3	3.0	1.8	—	—
525	11.1	7.1	5.9	5.2	4.4	3.3	2.0	—	—	—	—
550	8.6	4.9	3.8	3.1	2.3	0.8	—	—	—	—	—

別表 1.7-(C) ハスティオイXRの設計緩和強さ S_r (kg/mm²)

温度°C	時間h	0.1	0.3	1	3	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5
450	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6	19.6
500	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.1	19.0	18.5	17.6	15.7	
550	18.4	18.4	18.4	18.4	18.4	18.3	18.1	17.6	16.2	14.9	12.8	11.0	9.3	
600	18.4	18.4	18.3	18.1	17.4	16.3	14.3	12.5	10.6	9.1	7.6	6.3	5.1	
650	18.1	17.6	16.4	14.9	12.6	11.1	9.4	8.0	6.5	5.3	4.4	3.6	2.9	
700	15.4	13.8	11.9	10.2	8.6	7.1	5.8	4.7	4.0	3.2	0.94	0.92	0.85	
750	11.3	9.6	8.0	6.7	5.4	4.5	3.7	3.1	0.90	0.89	0.83	0.73	0.54	
800	7.5	6.3	5.1	4.3	3.5	2.2	0.86	0.79	0.77	0.68	0.49	0.30	0.14	
850	5.2	4.4	3.5	2.6	1.57	0.91	0.77	0.69	0.52	0.32	0.15	0.06	—	
900	3.7	2.9	2.0	1.40	0.87	0.69	0.56	0.38	0.19	0.08	—	—	—	
950	2.3	1.78	1.27	0.84	0.58	0.42	0.24	0.12	—	—	—	—	—	
1000	1.64	1.22	0.82	0.54	0.31	0.17	0.07	—	—	—	—	—	—	

別表 1.7 -(d) SUS 321伝熱管の設計緩和強さ S_r (kg/mm²)

時間 h 温度°C	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	16.2	16.0	15.5	14.9	14.6
450	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	16.1	15.8	15.1	14.5	13.9	13.0
475	16.3	16.3	16.3	16.2	16.0	15.5	14.7	13.9	13.3	12.0	10.4
500	16.3	16.3	16.2	15.9	15.2	14.2	13.4	12.5	11.1	9.3	7.6
525	16.2	16.0	15.6	14.8	13.8	12.7	11.8	10.2	8.4	6.6	5.1
550	16.0	15.4	14.5	13.2	12.1	11.0	9.5	7.5	5.8	4.2	2.9
575	15.5	14.1	12.8	11.5	10.3	8.7	6.9	5.0	3.4	1.6	—
600	14.9	12.5	11.0	9.7	8.2	6.2	4.4	2.5	—	—	—
625	13.8	10.6	9.2	7.6	5.8	3.8	1.8	—	—	—	—
650	12.2	8.7	7.2	5.3	3.4	—	—	—	—	—	—

別表 1.7 -(e) SUS 316 の設計緩和強さ S_r (kg/mm²)

時間 h 温度°C	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.5	16.3	16.1	15.9
450	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3	16.2	16.0	15.7	15.3	14.9	14.3
475	16.0	16.0	16.0	16.0	15.8	15.4	14.8	14.2	13.7	12.7	11.4
500	15.9	15.8	15.7	15.4	14.8	13.8	13.0	12.2	11.1	9.6	8.1
525	15.6	15.3	14.9	13.9	12.7	11.4	10.5	9.4	8.0	6.5	5.2
550	15.3	14.3	13.1	11.5	10.0	8.8	7.8	6.5	5.2	3.8	2.7
575	14.7	12.2	10.4	8.6	7.3	6.2	5.2	4.0	2.9	1.8	0.8
600	13.1	9.4	7.6	6.0	4.8	3.8	2.9	1.9	1.0	—	—
625	10.6	6.6	5.0	3.6	2.6	1.8	1.0	—	—	—	—
650	7.9	4.2	2.9	1.7	0.8	—	—	—	—	—	—

別表 1.8 縦弾性係数 E (kg/mm²)

温度 °C	2 1/4Cr-1Mo (NT)	ハステロイ X R	SUS321伝熱管 SUS316
400	18500	17100	17200
450	18300	16700	16700
500	17800	16400	16200
550	17200	16000	15700
600	—	15600	15200
650	—	15300	14700
700	—	14900	—
750	—	14500	—
800	—	14200	—
850	—	13800	—
900	—	13400	—
950	—	13100	—
1000	—	12700	—

別表 1.9 ポアソン比 ν

温度 °C	2 1/4Cr-1Mo (NT)	ハステロイ X R	SUS321伝熱管 SUS316
400	0.300	0.300	0.300
450	0.300	0.300	0.300
500	0.300	0.300	0.302
550	0.300	0.300	0.306
600	—	0.300	0.310
650	—	0.300	0.314
700	—	0.300	—
750	—	0.300	—
800	—	0.300	—
850	—	0.300	—
900	—	0.300	—
950	—	0.300	—
1000	—	0.300	—

別表 1.10 熱膨張係数 α (10^{-6} mm/mm/°C)

温度 °C	2 1/4 Cr - 1 Mo(NT)		ハステロイ X R		SUS 321 伝熱管 SUS 316	
	A	B	A	B	A	B
200	11.63	—	14.0	—	15.15	—
1000	12.68	12.10	14.0	14.0	16.48	15.82
1500	13.24	12.43	14.0	14.0	17.22	16.18
2000	13.73	12.70	14.1	14.0	17.85	16.54
2500	14.14	12.96	14.4	14.1	18.36	16.88
3000	14.49	13.21	14.6	14.2	18.79	17.20
3500	14.75	13.42	15.4	14.4	19.19	17.47
4000	15.00	13.61	15.5	14.6	19.57	17.69
4500	15.20	13.81	16.1	14.8	19.93	17.89
5000	15.36	13.97	16.3	14.9	20.28	18.12
5500	15.49	14.11	16.6	15.1	20.60	18.33
6000	—	—	16.9	15.3	20.87	18.54
6500	—	—	17.1	15.5	21.09	18.74
7000	—	—	17.3	15.7	—	—
7500	—	—	17.7	15.8	—	—
8000	—	—	18.7	16.0	—	—
8500	—	—	19.1	16.2	—	—
9000	—	—	19.4	16.4	—	—
9500	—	—	18.2	16.5	—	—
10000	—	—	18.0	16.6	—	—

(備考) Aは瞬時熱膨張係数

Bは室温からその温度までの平均熱膨張係数

別表 1.11 - (a), (b) 2 1/4 Cr-1Mo (NT) の許容ひずみ範囲(A) ϵ_t (mm/mm)

温度°C	375	400	425	450	475	500	525	550
継返 回数 Nd								
10	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387	0.0387
2×10	0.0273	0.0258	0.0252	0.0245	0.0239	0.0232	0.0223	0.0211
4×10	0.0202	0.0172	0.0164	0.0156	0.0147	0.0139	0.0131	0.0122
10^2	0.0137	0.0105	0.00993	0.00938	0.00882	0.00827	0.00772	0.00718
2×10^2	0.01030	0.00794	0.00751	0.00708	0.00665	0.00623	0.00581	0.00540
4×10^2	0.00770	0.00639	0.00603	0.00569	0.00534	0.00500	0.00467	0.00434
10^3	0.00553	0.00488	0.00466	0.00445	0.00423	0.00400	0.00374	0.00348
2×10^3	0.00427	0.00398	0.00384	0.00369	0.00354	0.00338	0.00318	0.00296
4×10^3	0.00343	0.00325	0.00316	0.00306	0.00297	0.00285	0.00271	0.00253
10^4	0.00253	0.00248	0.00244	0.00239	0.00235	0.00228	0.00219	0.00204
2×10^4	0.00207	0.00202	0.00201	0.00199	0.00197	0.00193	0.00187	0.00174
4×10^4	0.00165	0.00165	0.00165	0.00165	0.00165	0.00163	0.00159	0.00151
10^5	0.00133	0.00131	0.00131	0.00131	0.00131	0.00130	0.00129	0.00125
2×10^5	0.00110	0.00110	0.00110	0.00110	0.00110	0.00110	0.00110	0.00109
4×10^5	0.000945	0.000945	0.000945	0.000945	0.000945	0.000945	0.000945	0.000945
10^6	0.000833	0.000833	0.000833	0.000833	0.000833	0.000833	0.000833	0.000833

(備考) 本表は繰返しひずみ速度が 10^{-3} mm/mm/sec 以上の場合に適用することができます。

別表 1.11-(c) ハステロイ X R の許容ひずみ範囲(A) ϵ_t (mm/mm)

温度°C 繰返し 回数 Nd	425	500	600	700	800	900	1000
2 × 10	0.0201	0.0195	0.0186	0.0178	0.0170	0.0161	0.0152
4 × 10	0.0145	0.0140	0.0131	0.0126	0.0119	0.0111	0.0102
10 ²	0.00990	0.00940	0.00875	0.00830	0.00760	0.00700	0.00630
2 × 10 ²	0.00780	0.00740	0.00685	0.00630	0.00575	0.00510	0.00450
4 × 10 ²	0.00640	0.00600	0.00550	0.00500	0.00440	0.00385	0.00335
10 ³	0.00500	0.00470	0.00430	0.00380	0.00335	0.00290	0.00245
2 × 10 ³	0.00420	0.00390	0.00360	0.00320	0.00280	0.00238	0.00200
4 × 10 ³	0.00365	0.00340	0.00310	0.00272	0.00239	0.00201	0.00168
10 ⁴	0.00303	0.00280	0.00252	0.00225	0.00195	0.00163	0.00135
2 × 10 ⁴	0.00270	0.00248	0.00223	0.00196	0.00170	0.00140	0.00115
4 × 10 ⁴	0.00248	0.00224	0.00200	0.00175	0.00150	0.00125	0.00100
10 ⁵	0.00220	0.00200	0.00176	0.00152	0.00130	0.00106	0.000860
2 × 10 ⁵	0.00205	0.00185	0.00162	0.00140	0.00118	0.000960	0.000770
4 × 10 ⁵	0.00191	0.00172	0.00151	0.00130	0.00110	0.000890	0.000710
10 ⁶	0.00180	0.00163	0.00143	0.00122	0.00102	0.000825	0.000655

(備考) 本表は繰返しひずみ速度が 10^{-3} mm/mm/sec 以上の場合に適用することができる。

別表 1.11-(d),(e) SUS 321伝熱管及びSUS 316の許容ひずみ範囲(A) ϵ_t (mm/mm)

絶対 熱伝 導度 N d	温度°C	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650
10	0.0500	0.0331	0.0323	0.0316	0.0308	0.0300	0.0291	0.0283	0.0274	0.0265	
2×10	0.0362	0.0238	0.0232	0.0225	0.0219	0.0212	0.0205	0.0198	0.0191	0.0184	
4×10	0.0268	0.0173	0.0168	0.0163	0.0158	0.0152	0.0147	0.0141	0.0136	0.0130	
10^2	0.0185	0.0116	0.0113	0.0109	0.0105	0.0102	0.00978	0.00940	0.00902	0.00864	
2×10^2	0.0142	0.00891	0.00864	0.00836	0.00807	0.00779	0.00750	0.00721	0.00693	0.00665	
4×10^2	0.0113	0.00705	0.00684	0.00662	0.00641	0.00619	0.00597	0.00576	0.00554	0.00533	
10^3	0.00838	0.00544	0.00529	0.00513	0.00498	0.00482	0.00467	0.00452	0.00436	0.00421	
2×10^3	0.00685	0.00462	0.00450	0.00437	0.00424	0.00411	0.00398	0.00385	0.00372	0.00359	
4×10^3	0.00571	0.00394	0.00383	0.00372	0.00361	0.00350	0.00339	0.00328	0.00317	0.00306	
10^4	0.00454	0.00318	0.00310	0.00301	0.00292	0.00283	0.00274	0.00265	0.00256	0.00247	
2×10^4	0.00392	0.00271	0.00264	0.00257	0.00249	0.00241	0.00233	0.00226	0.00218	0.00211	
4×10^4	0.00342	0.00231	0.00225	0.00219	0.00213	0.00207	0.00200	0.00194	0.00188	0.00182	
10^5	0.00288	0.00193	0.00189	0.00184	0.00179	0.00174	0.00170	0.00165	0.00160	0.00155	
2×10^5	0.00254	0.00172	0.00169	0.00165	0.00161	0.00157	0.00153	0.00149	0.00144	0.00141	
4×10^5	0.00227	0.00156	0.00153	0.00150	0.00146	0.00143	0.00139	0.00136	0.00132	0.00129	
10^6	0.00200	0.00140	0.00137	0.00134	0.00131	0.00128	0.00125	0.00122	0.00119	0.00116	

(備考) 本表は繰返しひずみ速度が 10^{-3} mm/sec以下の場合に適用することができます。

別表 1.1.2 -(a), (b) 2^{1/4} Cr-1 Mo (NT) の許容ひずみ範囲(B) ϵ_1 (mm/mm)

温度°C 継返 し回数 Nd	375	400	425	450	475	500	525	550
10	0.0387	0.0387	0.0383	0.0362	0.0341	0.0319	0.0297	0.0274
2×10	0.0273	0.0229	0.0214	0.0200	0.0185	0.0170	0.0155	0.0140
4×10	0.0202	0.0141	0.0131	0.0121	0.0111	0.0101	0.00920	0.00829
10^2	0.0137	0.00872	0.00808	0.00746	0.00685	0.00627	0.00570	0.00517
2×10^2	0.0103	0.00669	0.00621	0.00574	0.00528	0.00484	0.00442	0.00402
4×10^2	0.00770	0.00544	0.00506	0.00468	0.00432	0.00397	0.00364	0.00332
10^3	0.00553	0.00429	0.00404	0.00378	0.00349	0.00321	0.00294	0.00268
2×10^3	0.00427	0.00358	0.00341	0.00322	0.00297	0.00273	0.00250	0.00228
4×10^3	0.00343	0.00300	0.00287	0.00274	0.00253	0.00233	0.00213	0.00195
10^4	0.00253	0.00236	0.00230	0.00221	0.00204	0.00188	0.00172	0.00157
2×10^4	0.00207	0.00198	0.00194	0.00188	0.00176	0.00162	0.00149	0.00136
4×10^4	0.00165	0.00165	0.00163	0.00160	0.00152	0.00143	0.00132	0.00121
10^5	0.00133	0.00131	0.00130	0.00129	0.00126	0.00121	0.00115	0.00106
2×10^5	0.00110	0.00110	0.00110	0.00110	0.00109	0.00107	0.00104	0.000975
4×10^5	0.000945	0.000945	0.000945	0.000945	0.000945	0.000945	0.000945	0.000907
10^6	0.000833	0.000833	0.000833	0.000833	0.000833	0.000833	0.000833	0.000833

(備考) 本表は繰返しひずみ速度が 10^{-6} mm/mm/sec 以上の場合に適用することができます。

別表 1.12-(c) ハステロイ X R の許容ひずみ範囲(B) ϵ_t (mm/mm)

温度°C 繰返し 回数 Nd	425	500	600	700	800	800	1000
2×10	0.0111	0.0106	0.0100	0.00970	0.00930	0.00870	0.00840
4×10	0.00790	0.00760	0.00705	0.00665	0.00625	0.00580	0.00545
10^2	0.00555	0.00520	0.00485	0.00450	0.00410	0.00375	0.00340
2×10^2	0.00440	0.00415	0.00380	0.00342	0.00310	0.00275	0.00245
4×10^2	0.00370	0.00345	0.00315	0.00280	0.00248	0.00216	0.00188
10^3	0.00298	0.00276	0.00250	0.00222	0.00194	0.00165	0.00140
2×10^3	0.00250	0.00231	0.00210	0.00188	0.00163	0.00138	0.00116
4×10^3	0.00212	0.00199	0.00179	0.00160	0.00139	0.00116	0.000980
10^4	0.00176	0.00164	0.00148	0.00130	0.00112	0.000940	0.000780
2×10^4	0.00157	0.00145	0.00130	0.00113	0.000980	0.000820	0.000670
4×10^4	0.00141	0.00130	0.00115	0.00101	0.000860	0.000720	0.000580
10^5	0.00127	0.00115	0.00101	0.000885	0.000760	0.000620	0.000495
2×10^5	0.00118	0.00106	0.000940	0.000820	0.000700	0.000560	0.000450
4×10^5	0.00112	0.00101	0.000890	0.000775	0.000655	0.000520	0.000415
10^6	0.00106	0.000950	0.000825	0.000720	0.000605	0.000475	0.000380

(備考) 本表は繰返しひずみ速度が 10^{-6} mm/mm/sec 以上の場合に適用することができる。

\

別表1.12-(d),(e) SUS 321伝熱管及びSUS 316の許容ひずみ範囲(B) ε_t (mm/mm)

温度°C 繰返し回数 Nd	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650
10	0.0500	0.0265	0.0252	0.0238	0.0224	0.0210	0.0196	0.0182	0.0168	0.0155
2×10	0.0362	0.0185	0.0174	0.0163	0.0152	0.0142	0.0131	0.0121	0.0111	0.0101
4×10	0.0268	0.0131	0.0123	0.0115	0.0107	0.00987	0.00911	0.00838	0.00769	0.00704
10^2	0.0185	0.00875	0.00819	0.00765	0.00712	0.00662	0.00613	0.00568	0.00525	0.00485
2×10^2	0.0142	0.00676	0.00635	0.00595	0.00556	0.00519	0.00484	0.00451	0.00420	0.00391
4×10^2	0.0113	0.00544	0.00513	0.00483	0.00454	0.00426	0.00399	0.00374	0.00351	0.00328
10^3	0.00838	0.00431	0.00409	0.00387	0.00366	0.00344	0.00323	0.00303	0.00284	0.00266
2×10^3	0.00685	0.00367	0.00348	0.00330	0.00311	0.00293	0.00275	0.00258	0.00242	0.00226
4×10^3	0.00571	0.00313	0.00297	0.00281	0.00265	0.00249	0.00234	0.00219	0.00206	0.00193
10^4	0.00454	0.00253	0.00240	0.00227	0.00214	0.00201	0.00189	0.00178	0.00167	0.00156
2×10^4	0.00392	0.00216	0.00204	0.00193	0.00183	0.00173	0.00163	0.00154	0.00145	0.00137
4×10^4	0.00342	0.00187	0.00178	0.00169	0.00160	0.00152	0.00144	0.00136	0.00129	0.00122
10^5	0.00288	0.00160	0.00153	0.00146	0.00139	0.00132	0.00126	0.00120	0.00113	0.00108
2×10^5	0.00254	0.00145	0.00138	0.00132	0.00127	0.00121	0.00115	0.00110	0.00105	0.000996
4×10^5	0.00227	0.00133	0.00127	0.00122	0.00117	0.00112	0.00107	0.00102	0.000974	0.000929
10^6	0.00200	0.00120	0.00115	0.00111	0.00106	0.00102	0.00098	0.000937	0.000897	0.000858

(備考) 本表は繰返しひずみ速度が 10^{-6} mm/mm/sec以上の場合に適用することができます。

別表 1.1.3-(a), (b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) の許容ひずみ範囲(C) ϵ_t (mm/mm)

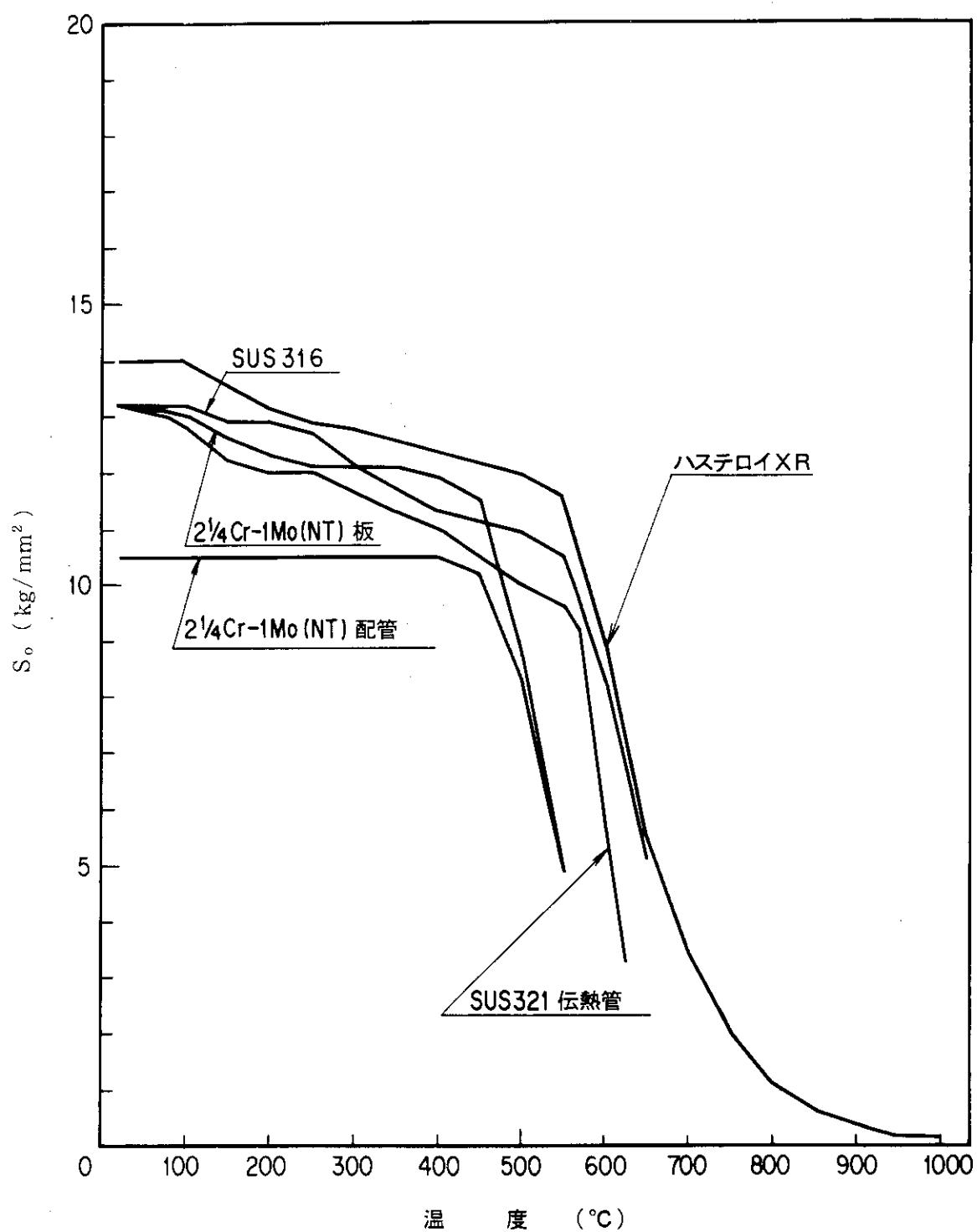
温度°C 繰返 し回数 Nd	37.5	400	425	450	475	500	525	550
10	0.0387	0.0359	0.0335	0.0310	0.0285	0.0260	0.0235	0.0210
2×10	0.0273	0.0200	0.0184	0.0168	0.0152	0.0136	0.0121	0.0106
4×10	0.0202	0.0123	0.0113	0.0102	0.00921	0.00825	0.00734	0.00649
10^2	0.0137	0.00772	0.00706	0.00643	0.00583	0.00525	0.00471	0.00421
2×10^2	0.0103	0.00597	0.00548	0.00501	0.00456	0.00413	0.00373	0.00335
4×10^2	0.00770	0.00489	0.00450	0.00413	0.00377	0.00343	0.00310	0.00280
10^3	0.00553	0.00393	0.00364	0.00334	0.00305	0.00277	0.00251	0.00227
2×10^3	0.00427	0.00333	0.00310	0.00284	0.00260	0.00236	0.00214	0.00193
4×10^3	0.00343	0.00282	0.00264	0.00242	0.00221	0.00201	0.00182	0.00165
10^4	0.00253	0.00226	0.00213	0.00196	0.00178	0.00163	0.00148	0.00133
2×10^4	0.00207	0.00191	0.00183	0.00169	0.00155	0.00141	0.00129	0.00117
4×10^4	0.00165	0.00162	0.00157	0.00148	0.00138	0.00126	0.00115	0.00104
10^5	0.00133	0.00130	0.00128	0.00124	0.00118	0.00110	0.00101	0.000921
2×10^5	0.00110	0.00110	0.00110	0.00108	0.00106	0.00102	0.000933	0.000851
4×10^5	0.000945	0.000945	0.000945	0.000945	0.000945	0.000933	0.000870	0.000795
10^6	0.000833	0.000833	0.000833	0.000833	0.000833	0.000833	0.000803	0.000734

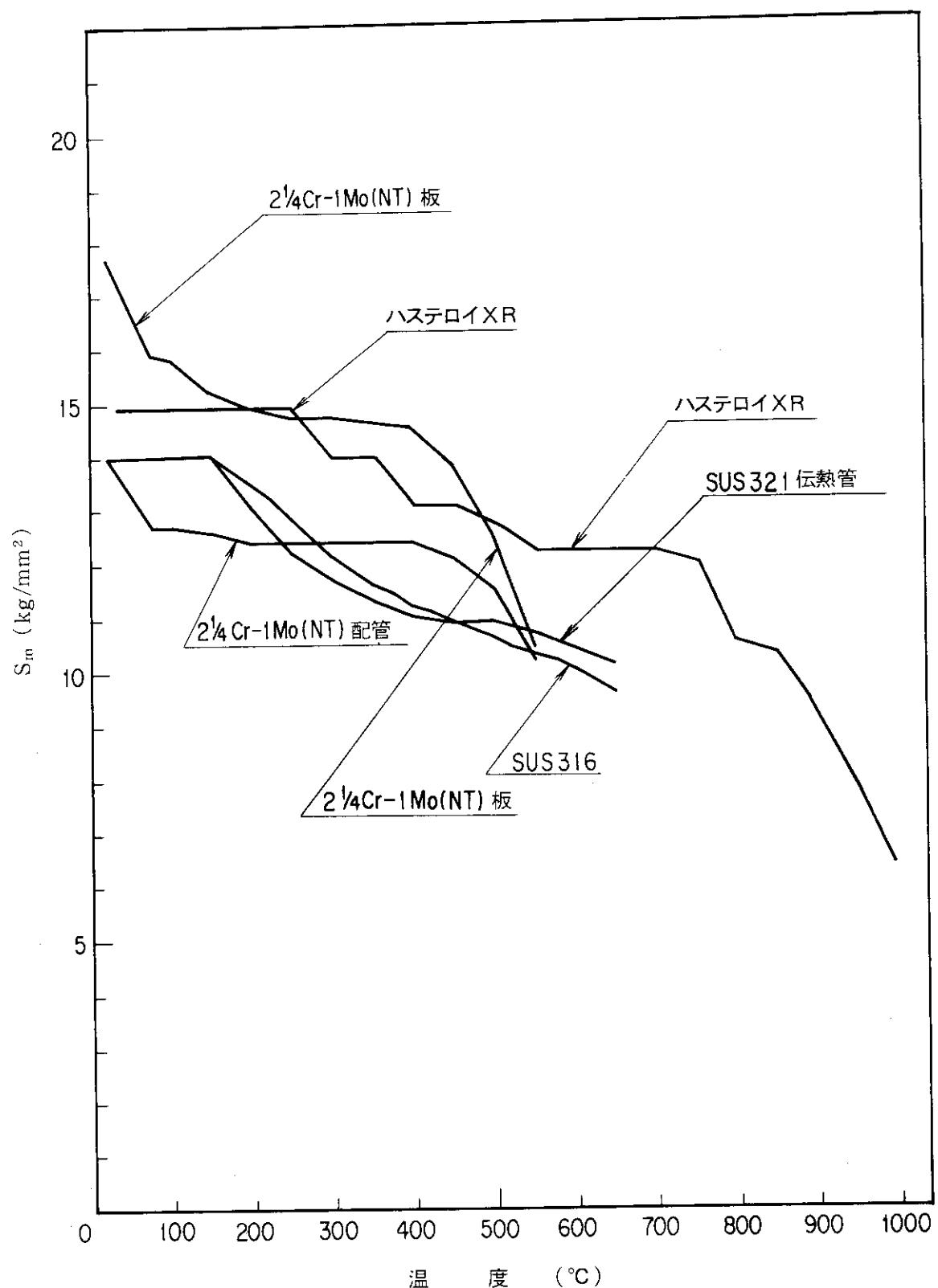
別表 1.13-(c) ハステロイ X R の許容ひずみ範囲(C) ϵ_t (mm/mm)

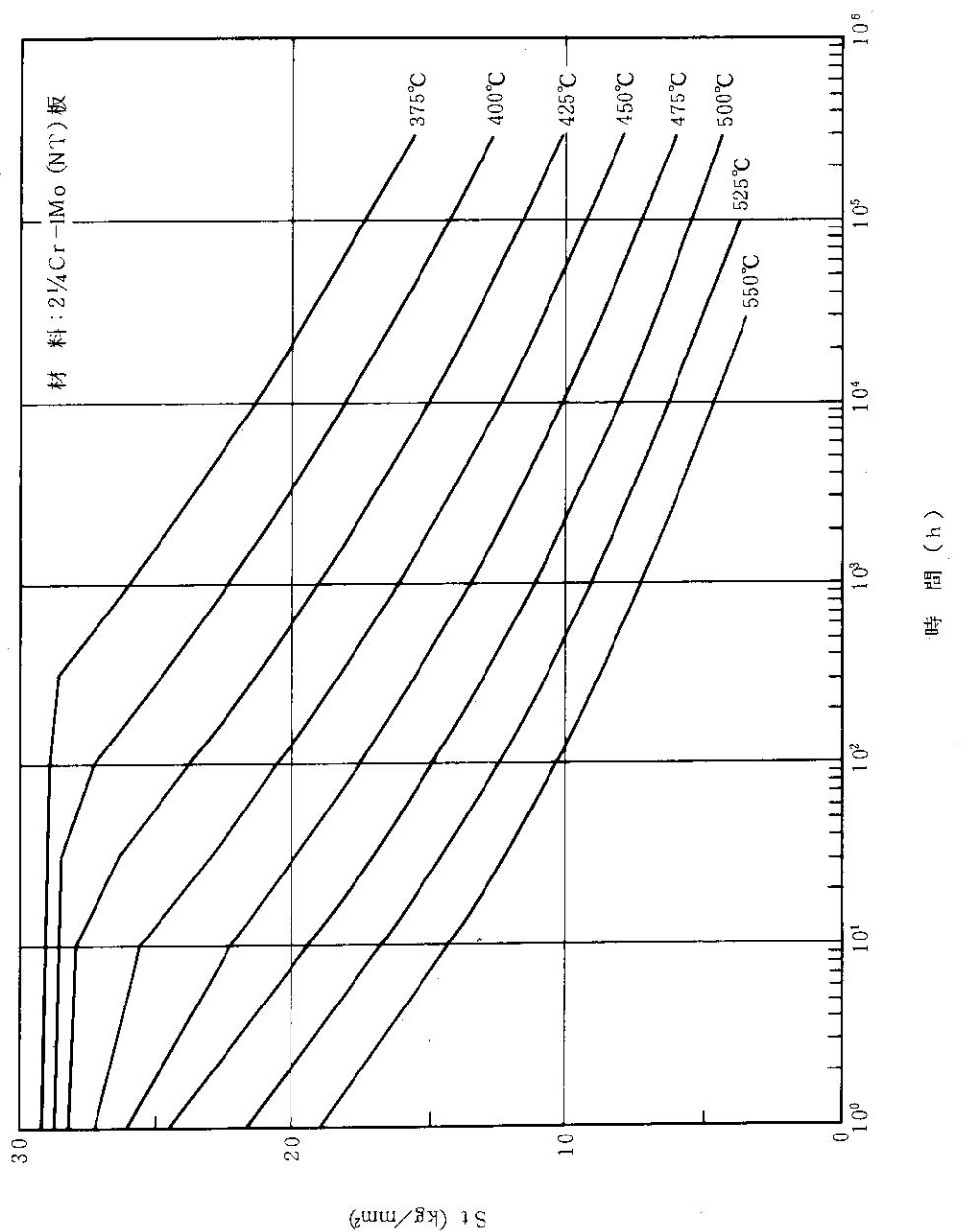
温度°C 繰返し 回数 Nd	425	500	600	700	800	900	1000
2×10	0.00490	0.00470	0.00440	0.00420	0.00392	0.00370	0.00349
4×10	0.00370	0.00352	0.00330	0.00308	0.00282	0.00262	0.00240
10^2	0.00265	0.00249	0.00220	0.00210	0.00190	0.00171	0.00151
2×10^2	0.00214	0.00199	0.00171	0.00165	0.00146	0.00130	0.00112
4×10^2	0.00178	0.00166	0.00149	0.00136	0.00120	0.00103	0.000880
10^3	0.00141	0.00130	0.00117	0.00107	0.000930	0.000785	0.000665
2×10^3	0.00119	0.00110	0.000985	0.000900	0.000785	0.000665	0.000555
4×10^3	0.00102	0.000955	0.000860	0.000780	0.000675	0.000570	0.000470
10^4	0.000865	0.000815	0.000725	0.000650	0.000560	0.000470	0.000385
2×10^4	0.000785	0.000730	0.000650	0.000570	0.000495	0.000410	0.000332
4×10^4	0.000725	0.000670	0.000595	0.000520	0.000445	0.000365	0.000295
10^5	0.000650	0.000600	0.000525	0.000460	0.000390	0.000320	0.000253
2×10^5	0.000615	0.000565	0.000490	0.000425	0.000360	0.000295	0.000232
4×10^5	0.000585	0.000535	0.000465	0.000400	0.000340	0.000275	0.000215
10^6	0.000555	0.000500	0.000435	0.000375	0.000318	0.000258	0.000200

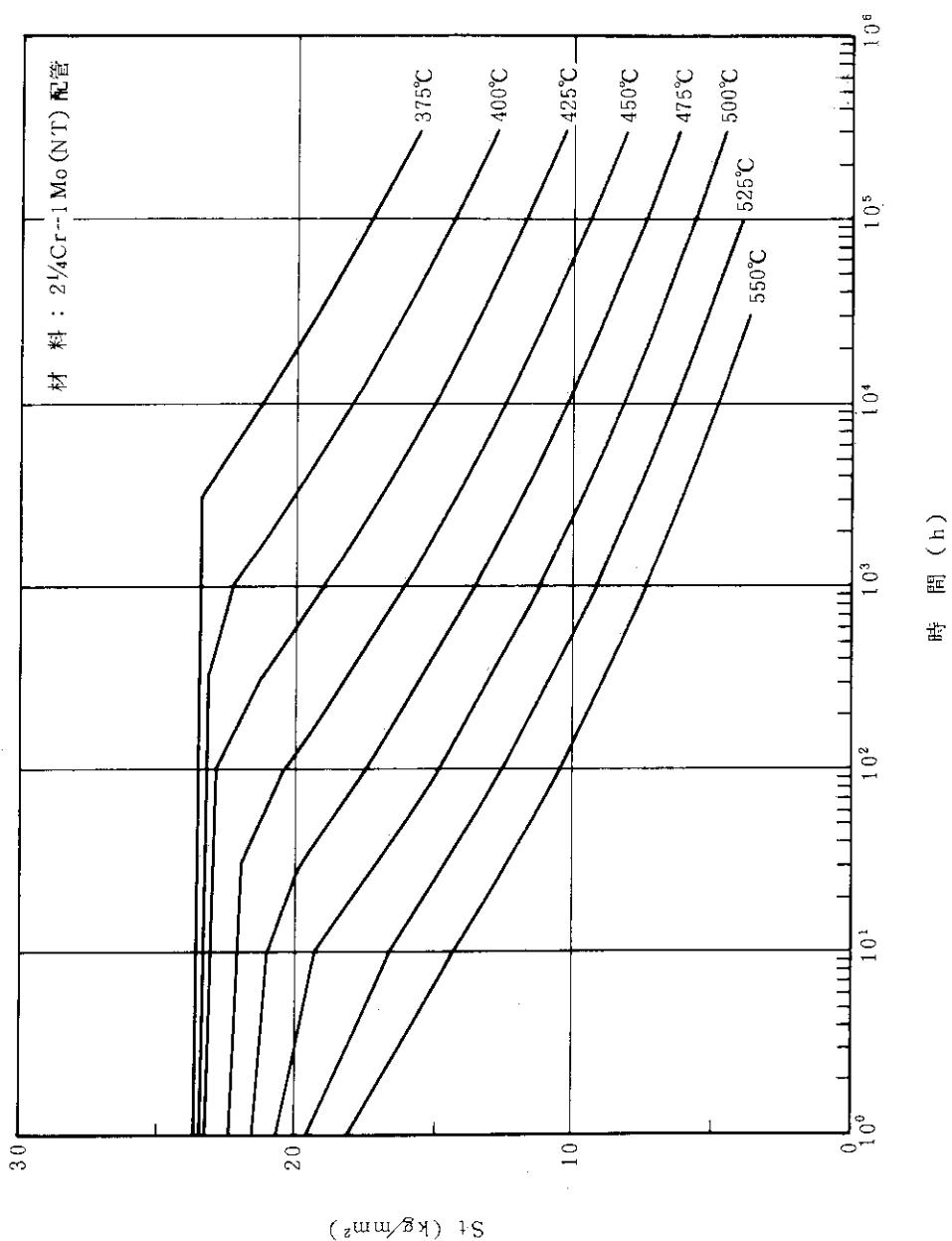
別表1.13-(d),(e) SUS 321伝熱管及びSUS316の許容ひずみ範囲(℃) ϵ_t (mm/mm)

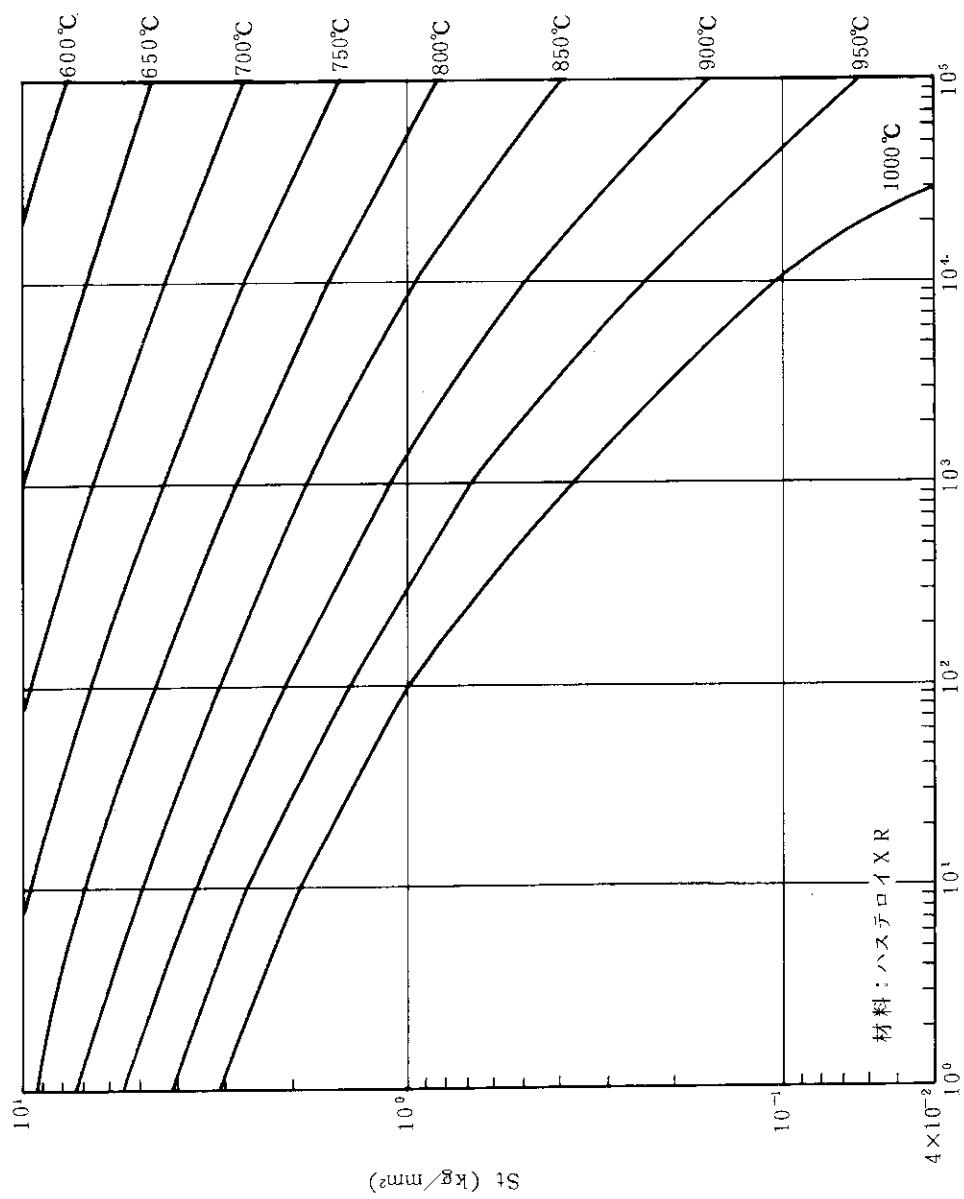
温度℃	425	450	475	500	525	550	575	600	625	650
繰返し回数 Nd										
10	0.0500	0.0227	0.0210	0.0194	0.0178	0.0162	0.0146	0.0131	0.0117	0.0104
2×10	0.0362	0.0155	0.0142	0.0130	0.0118	0.0107	0.00958	0.00857	0.00767	0.00679
4×10	0.0268	0.0109	0.0095	0.00907	0.00823	0.00744	0.00671	0.00604	0.00543	0.00488
10^2	0.0185	0.00730	0.00670	0.00614	0.00561	0.00512	0.00467	0.00425	0.00388	0.00354
2×10^2	0.0142	0.00571	0.00527	0.00486	0.00448	0.00412	0.00379	0.00348	0.00320	0.00295
4×10^2	0.0113	0.00467	0.00434	0.00402	0.00373	0.00345	0.00320	0.00296	0.00273	0.00251
10^3	0.00838	0.00377	0.00350	0.00325	0.00302	0.00280	0.00259	0.00240	0.00221	0.00203
2×10^3	0.00685	0.00321	0.00298	0.00277	0.00257	0.00238	0.00221	0.00204	0.00188	0.00173
4×10^3	0.00571	0.00273	0.00254	0.00236	0.00219	0.00203	0.00188	0.00174	0.00160	0.00147
10^4	0.00454	0.00220	0.00205	0.00191	0.00177	0.00164	0.00152	0.00141	0.00131	0.00122
2×10^4	0.00392	0.00188	0.00176	0.00165	0.00154	0.00144	0.00134	0.00125	0.00117	0.00109
4×10^4	0.00342	0.00165	0.00155	0.00146	0.00137	0.00128	0.00120	0.00113	0.00105	0.000987
10^5	0.00288	0.00143	0.00135	0.00127	0.00120	0.00113	0.00106	0.00100	0.000942	0.000887
2×10^5	0.00254	0.00130	0.00123	0.00117	0.00110	0.00104	0.000985	0.000930	0.000877	0.000828
4×10^5	0.00227	0.00120	0.00114	0.00108	0.00103	0.000972	0.000920	0.000871	0.000823	0.000779
10^6	0.00200	0.00110	0.00105	0.00094	0.000944	0.000897	0.000851	0.000807	0.000765	0.000726

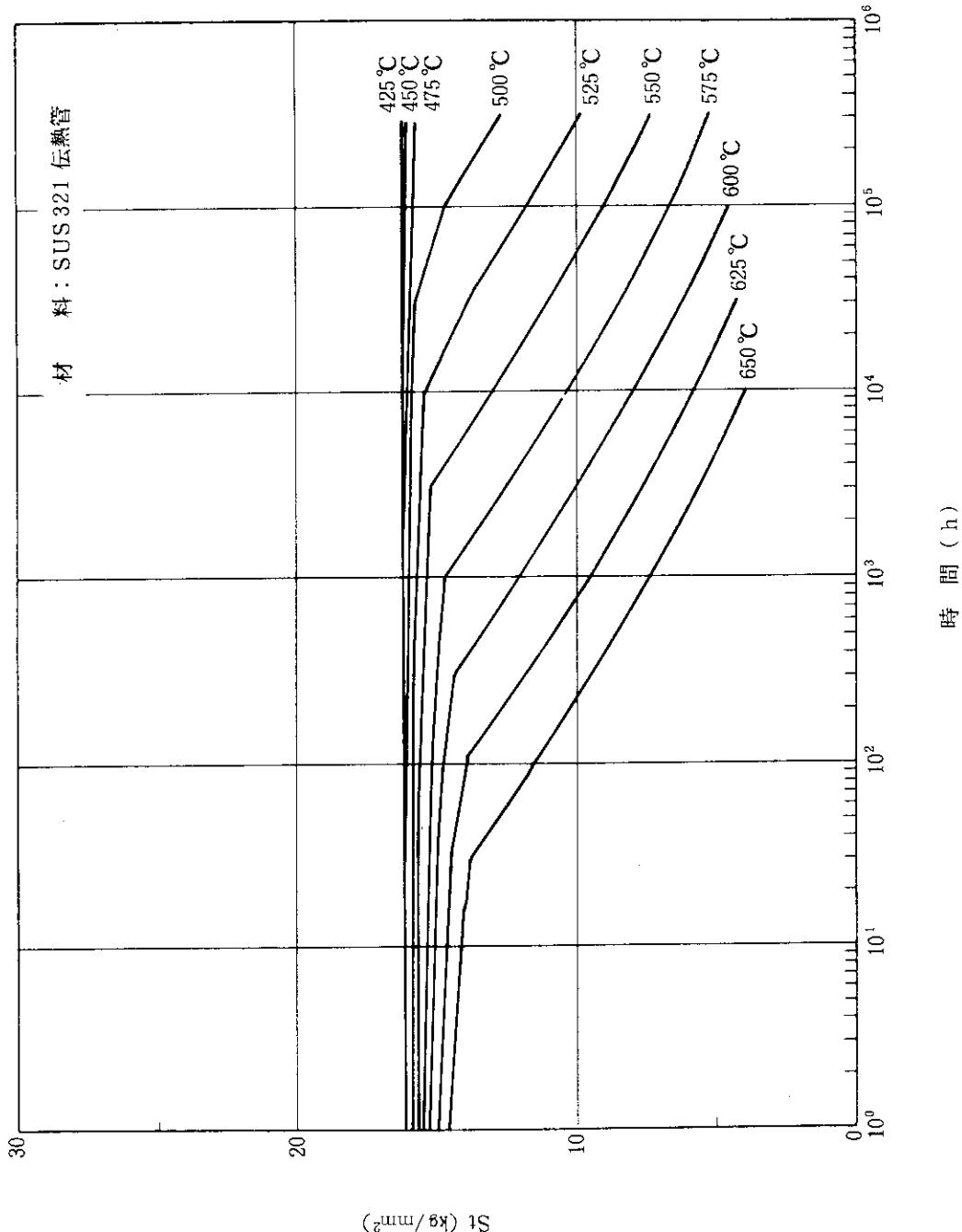
別図 1.1 最大許容応力強さ S_o (kg/mm²)

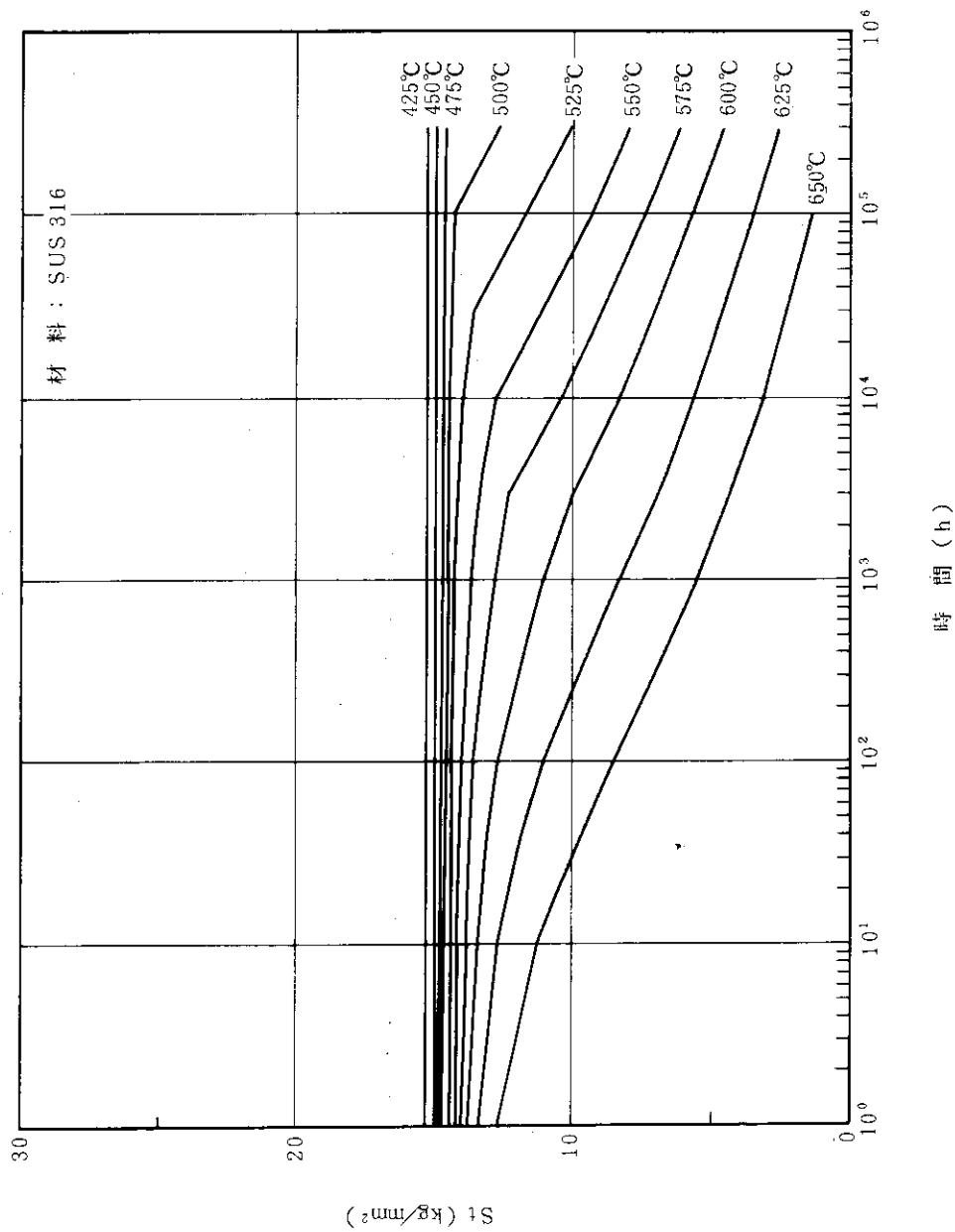
別図 1.2 設計応力強さ S_m (kg/mm²)

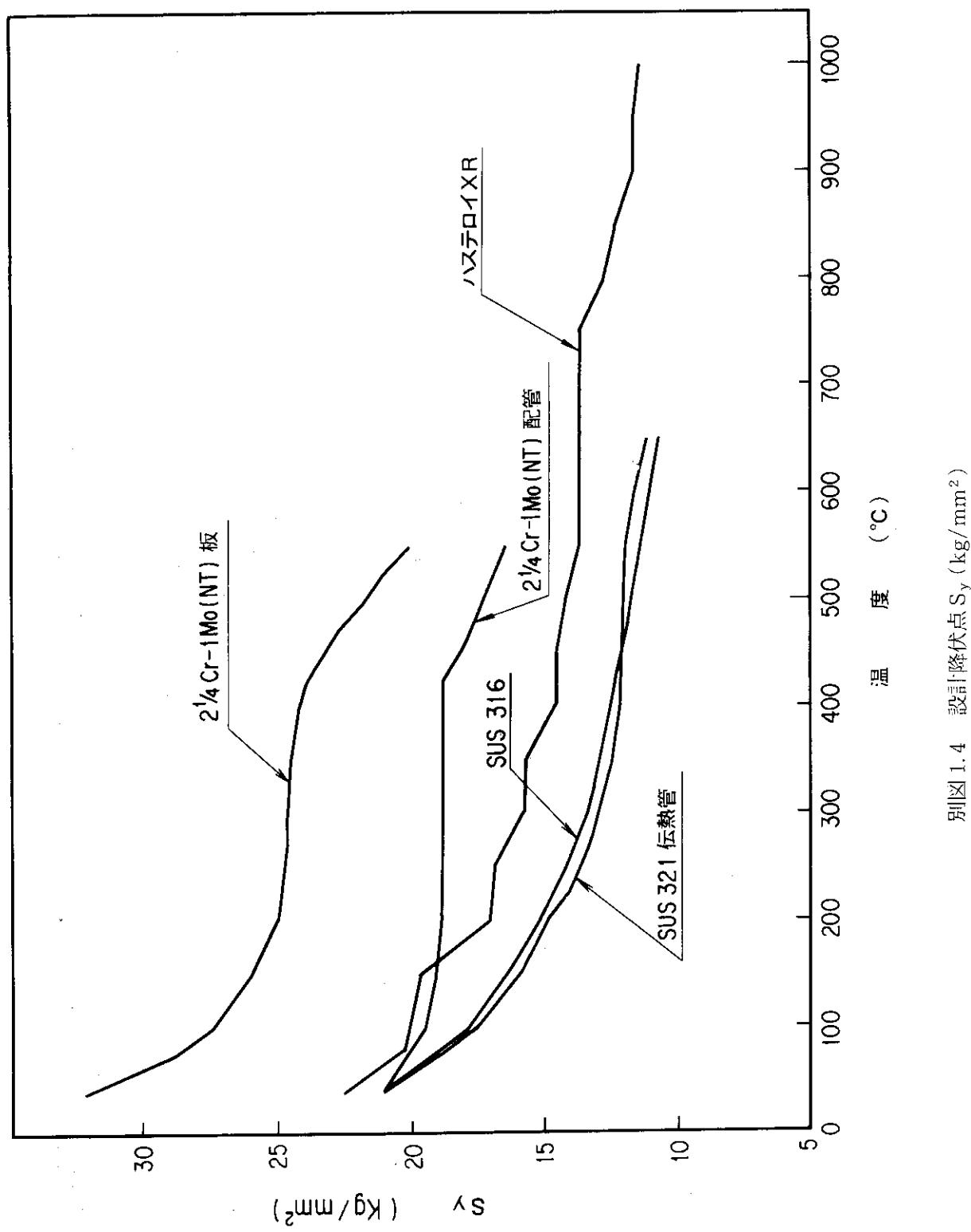


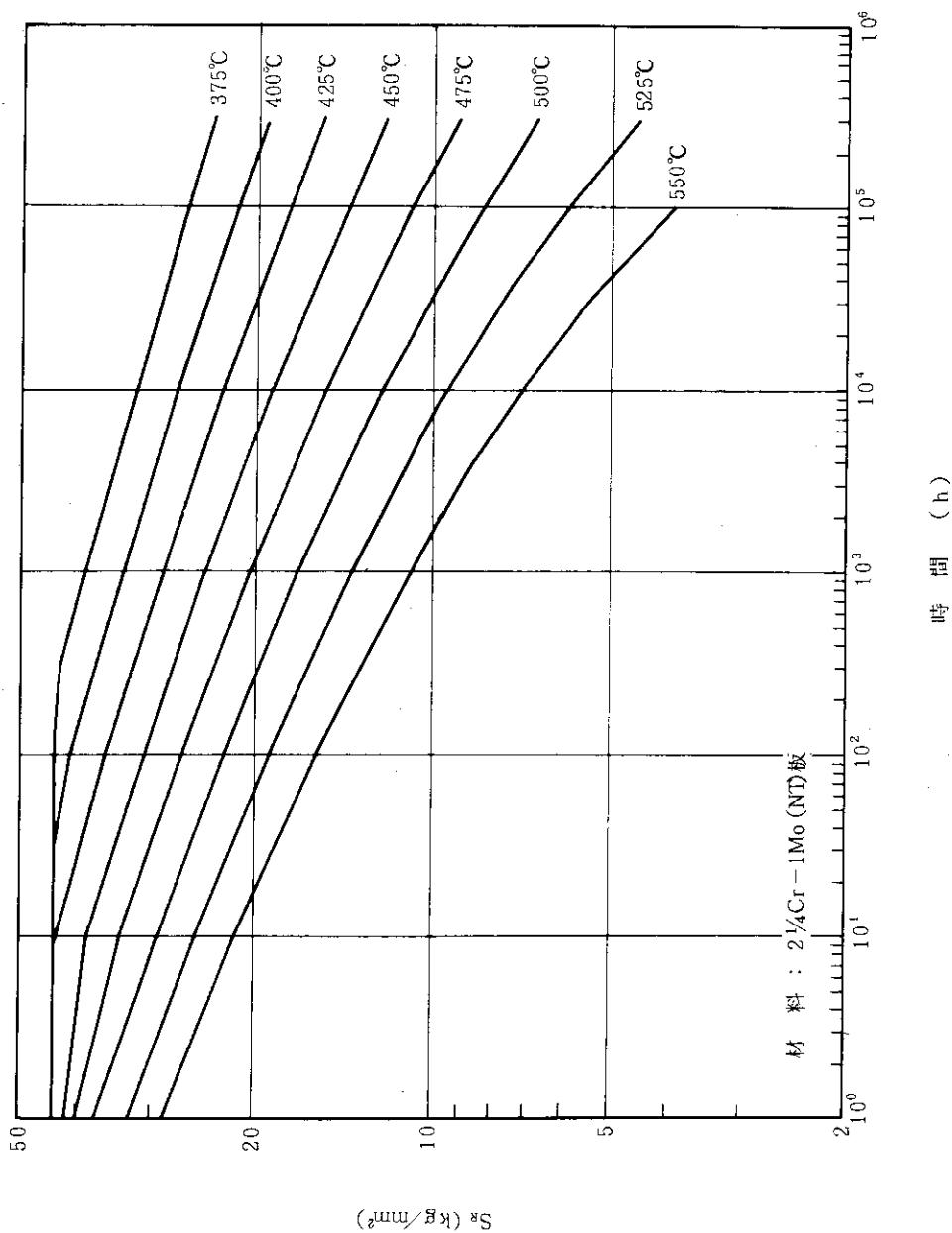
別図 1.3-(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管の試験応力強さ S_t (kg/mm^2)

別図 1.3-(c) ハスティロイX Rの設計応力強さ S_t (kg/mm^2)

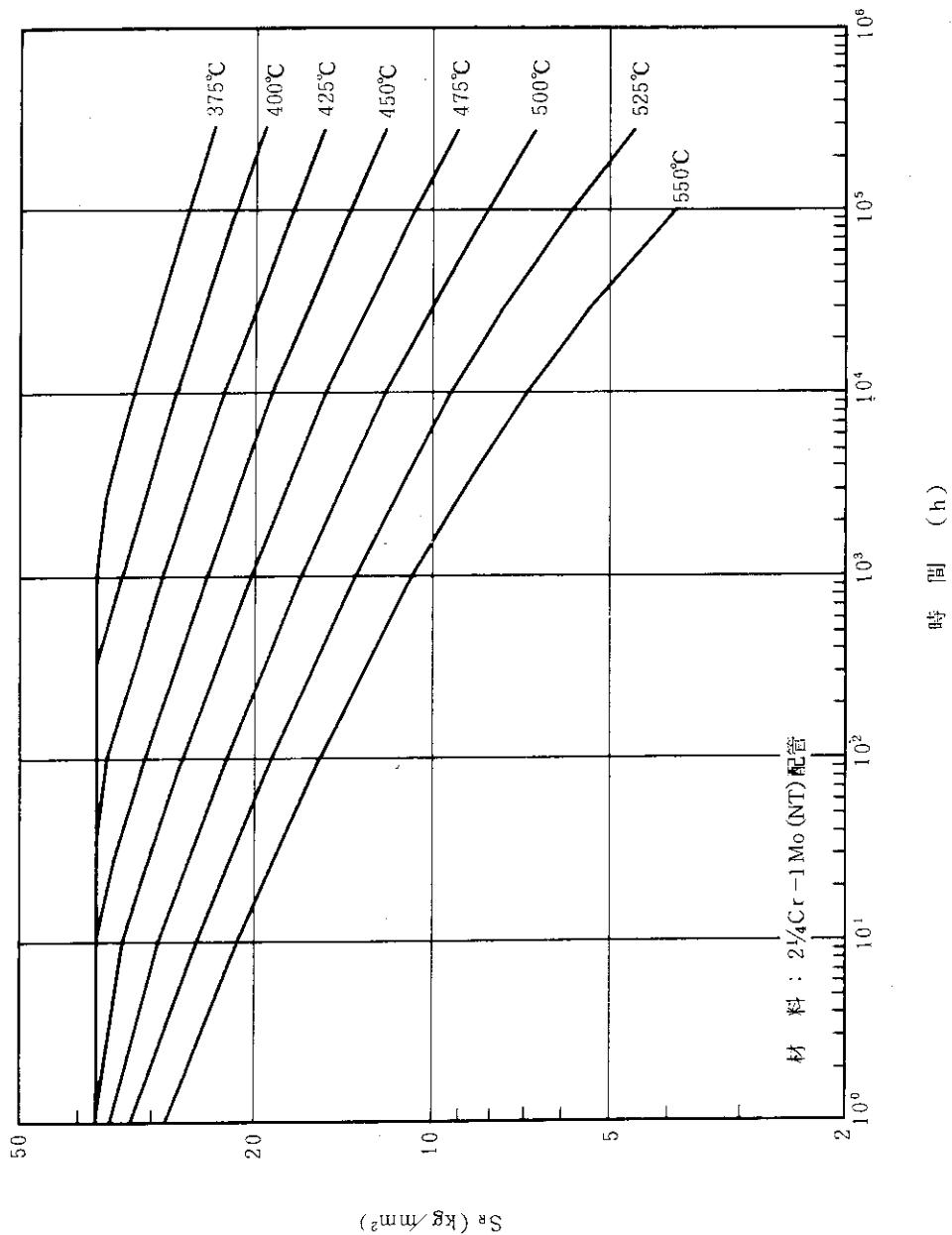
別図 1.3 -(d) SUS 321 伝熱管の設計応力強さ S_t (kg/mm^2)

別図 1.3-(e) SUS 316 の設計応力強さ S_t (kg/mm^2)

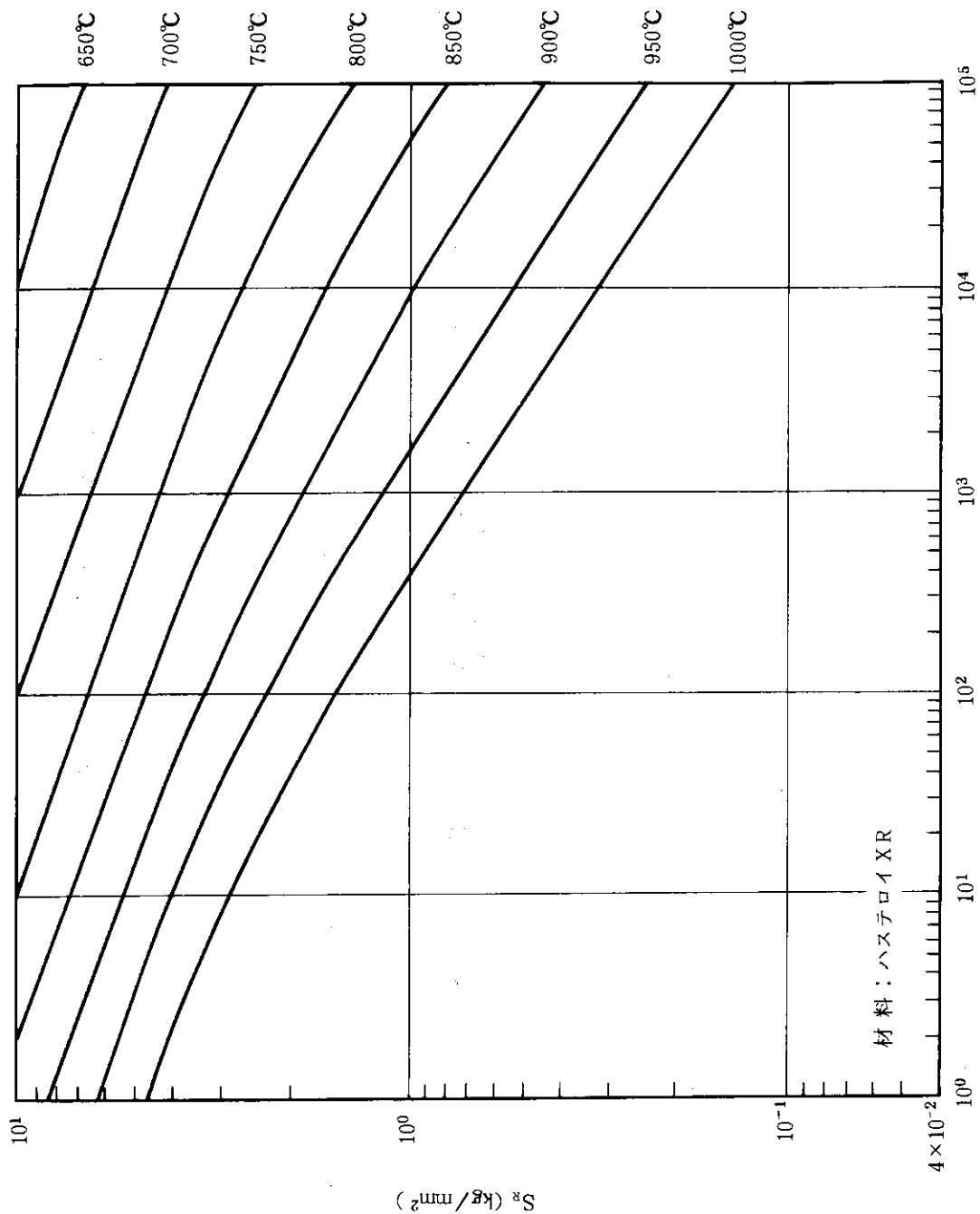


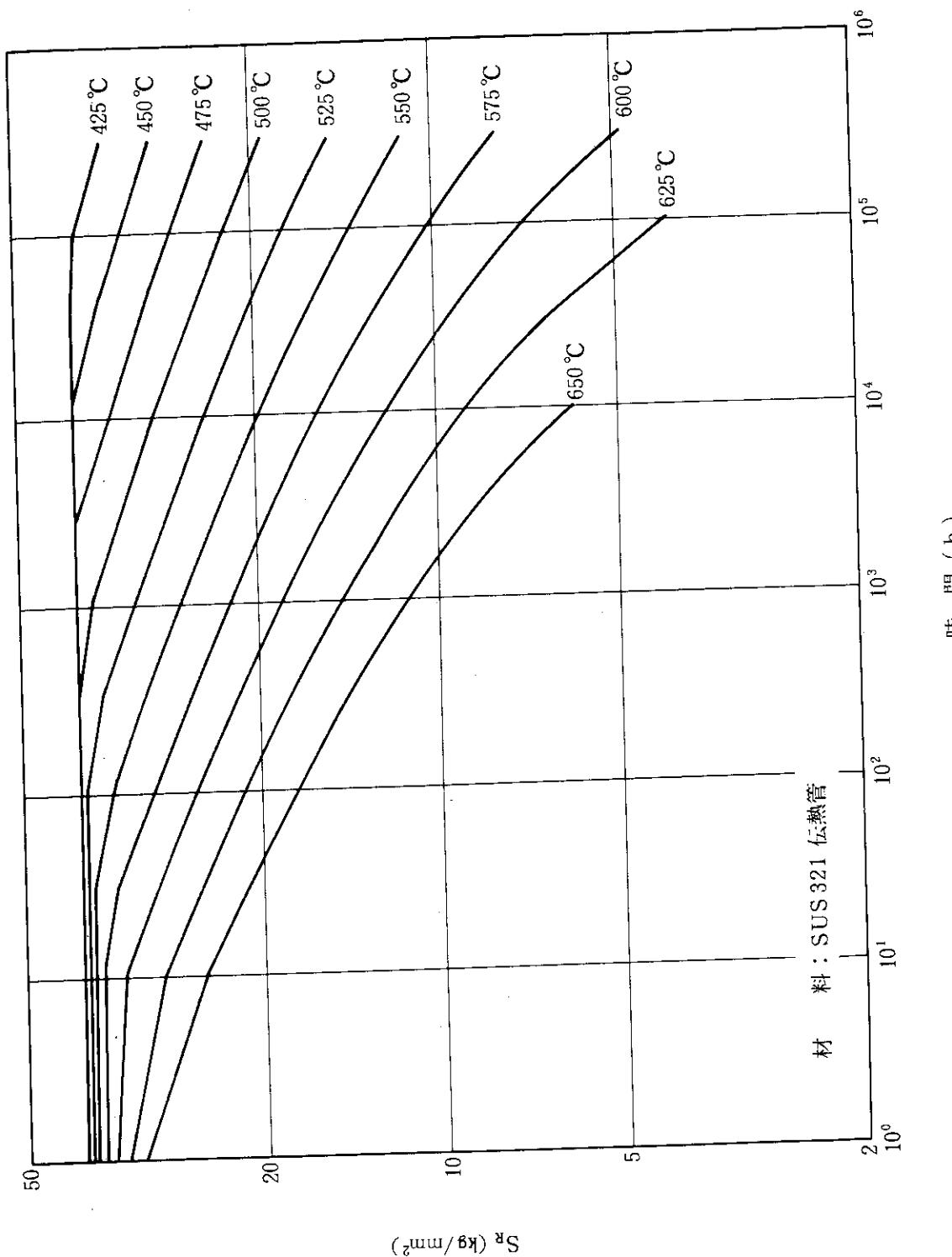


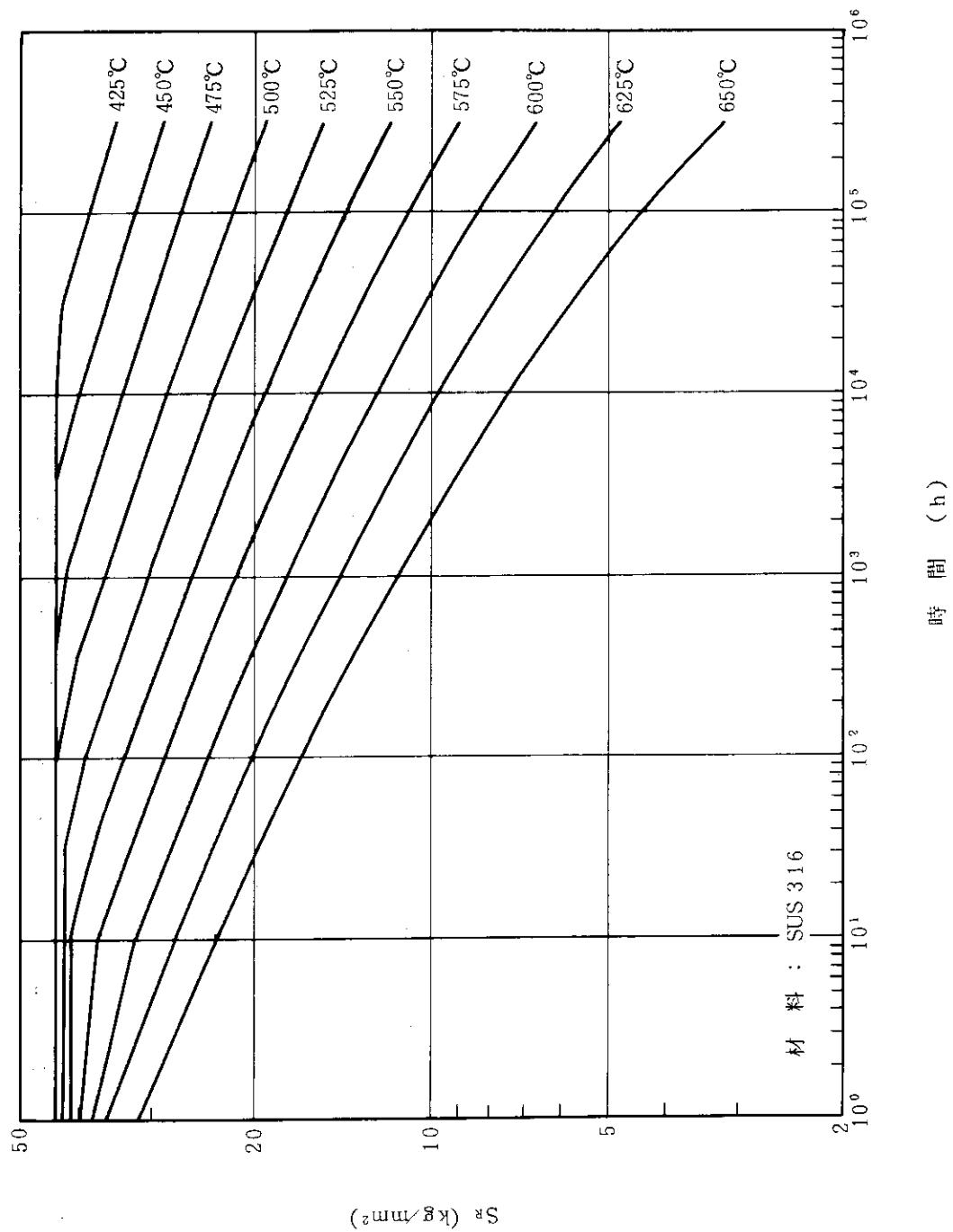
別図 1.5-(a) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板の設計クリープ破断応力強さ S_R (kg/mm²)



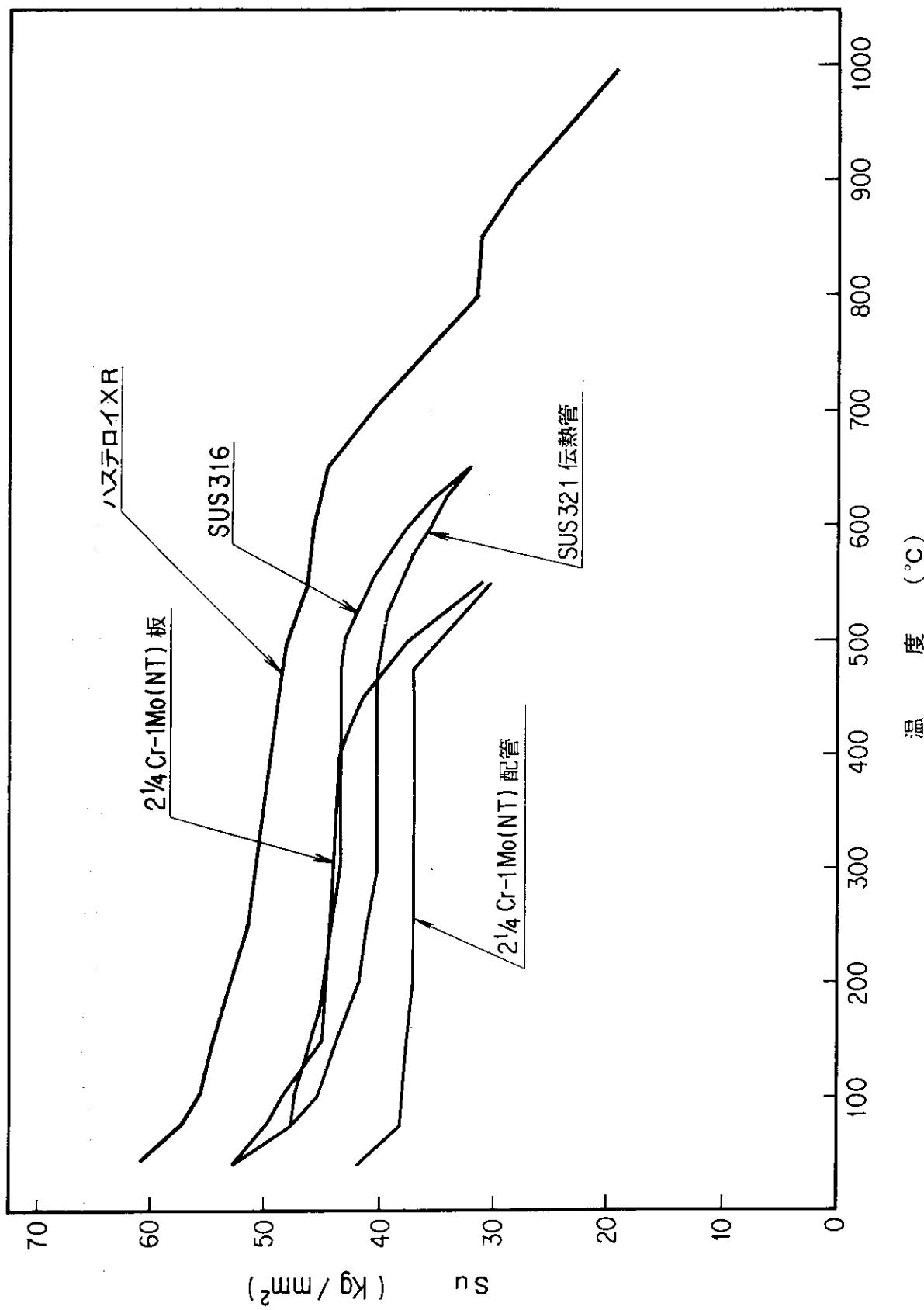
別図 1.5-(b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 鋼管の設計クリープ破断応力強さ S_r (kg/mm²)

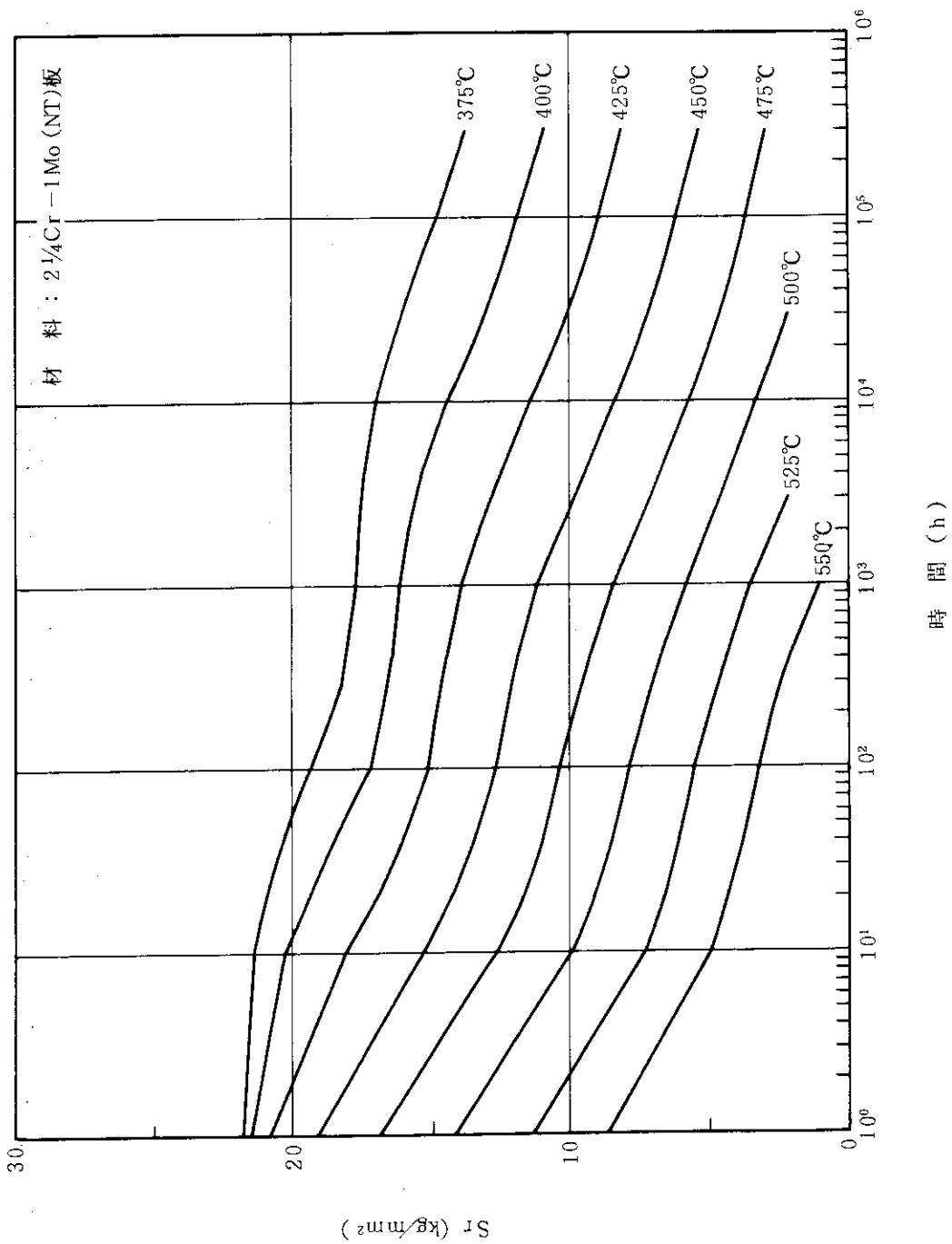
別図 1.5-(c) ハステロイXRの設計クリープ破断応力強さ S_r (kg/mm²)

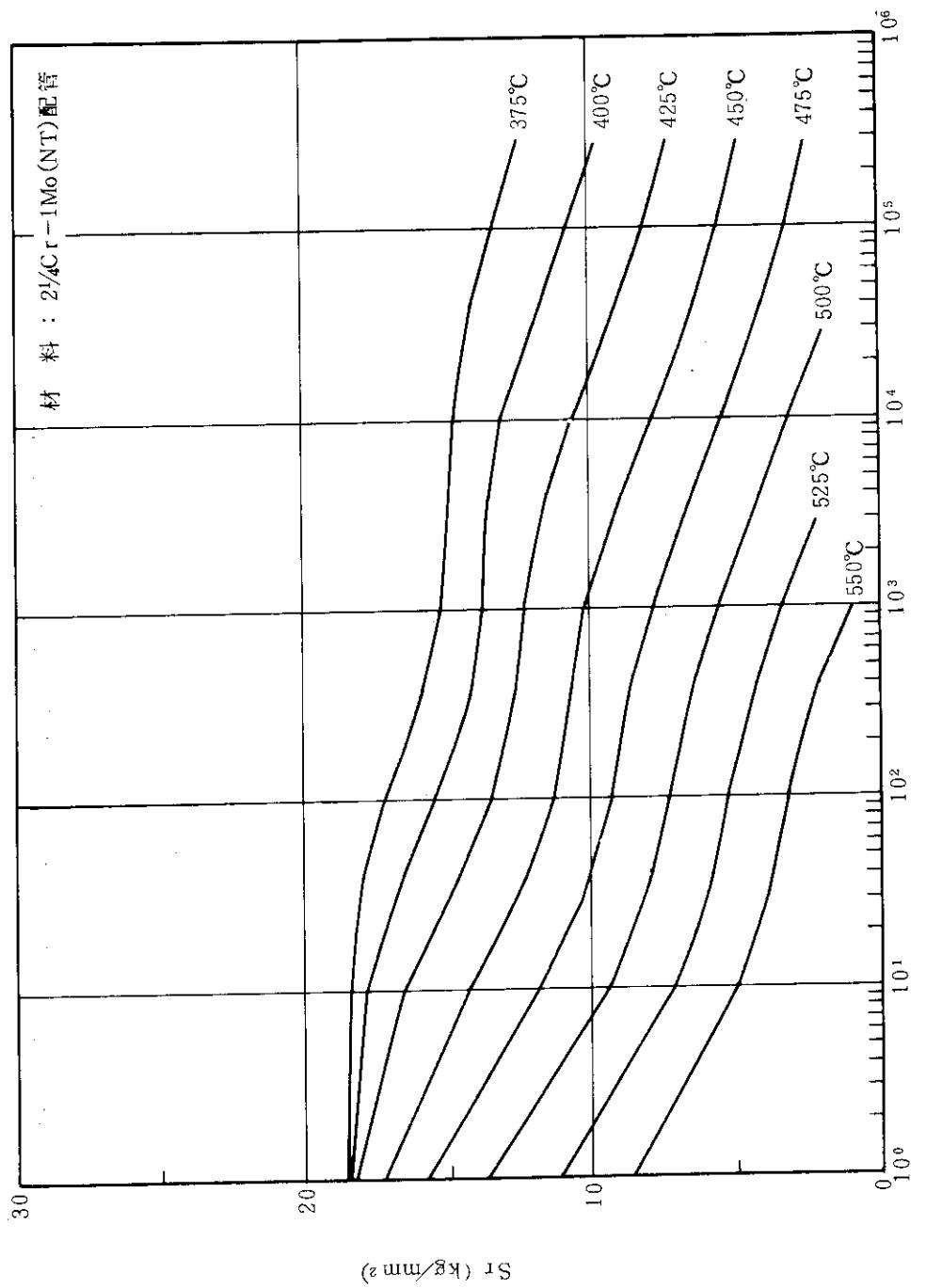
別図 1.5-(d) SUS 321 伝熱管の設計クリープ破断応力強さ S_R (kg/mm²)

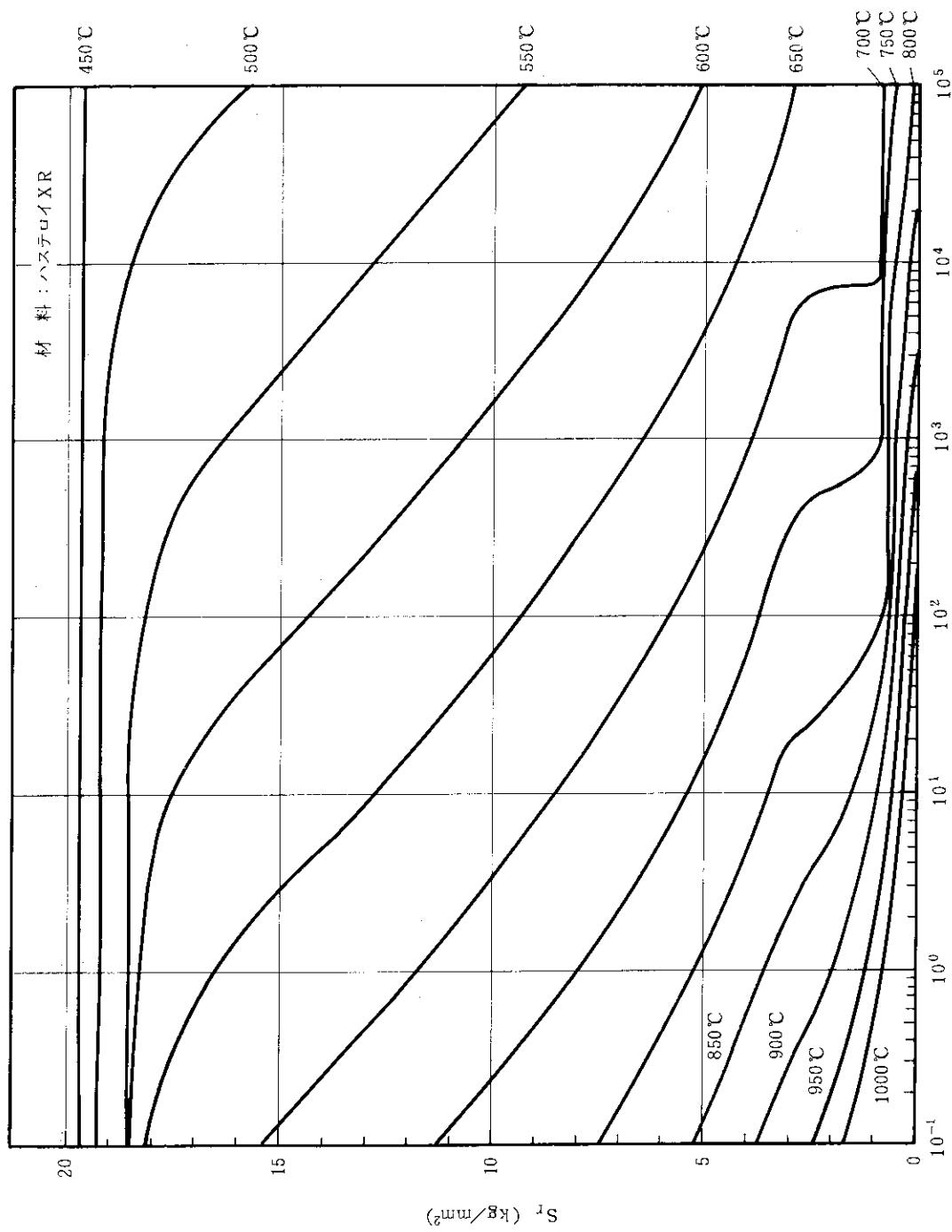


別図 1.5-(e) SUS 316 の設計クリープ強度 S_r (kg/mm²)

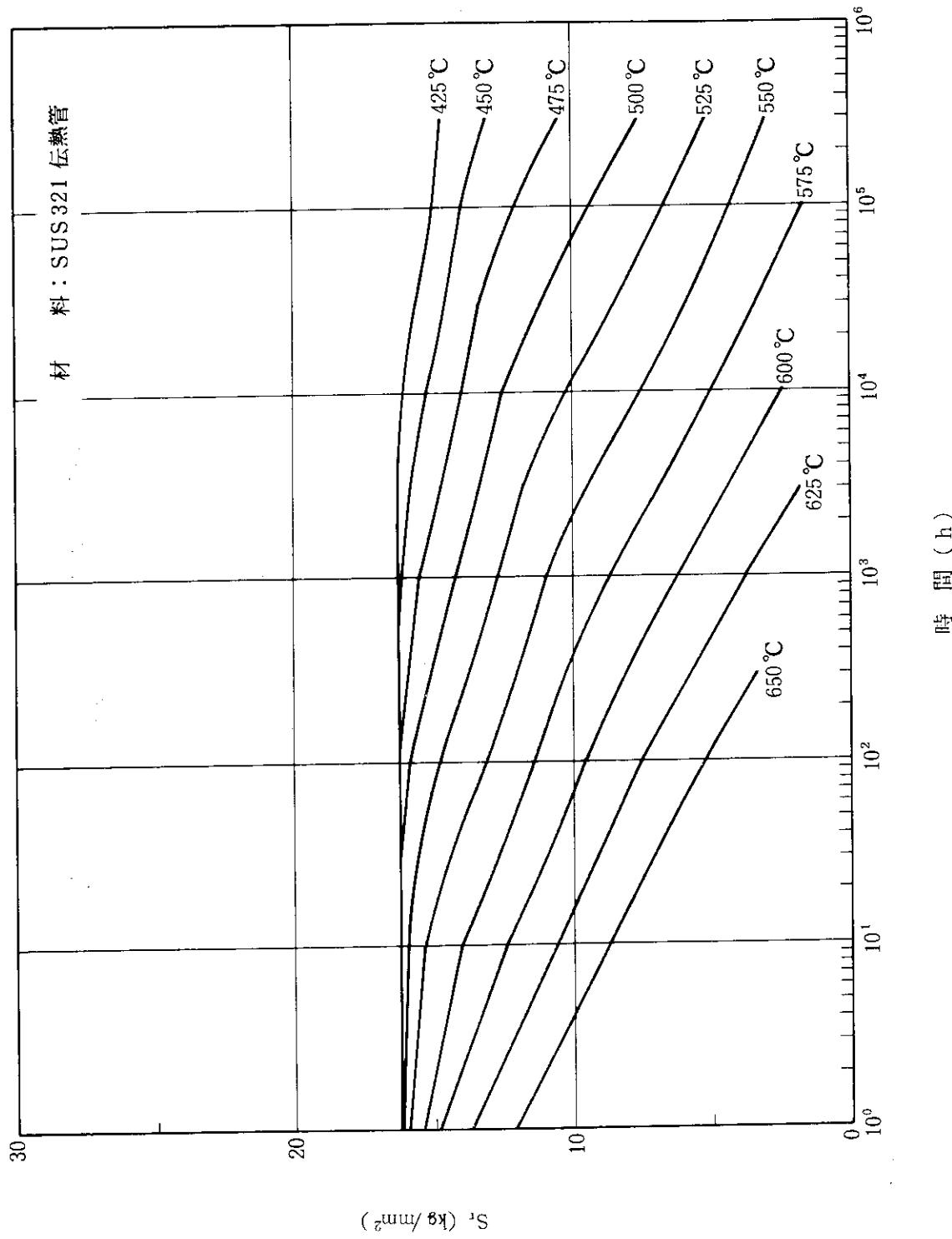
別図 1.6 設計引張強さ S_u (kg/mm²)

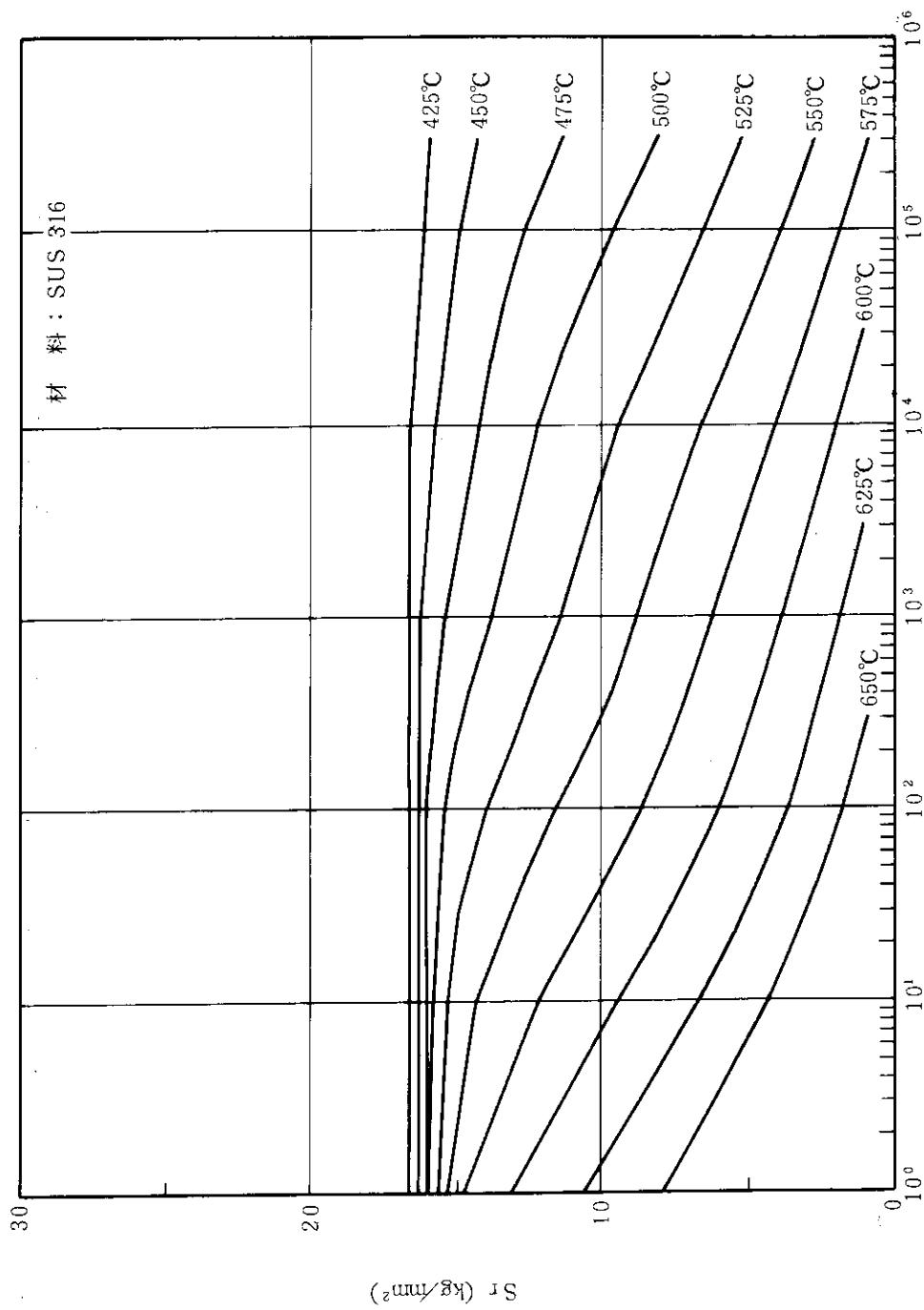
別図 1.7-(a) 2 1/4Cr-1Mo(NT)板の設計緩和強さ S_r (kg/mm^2)

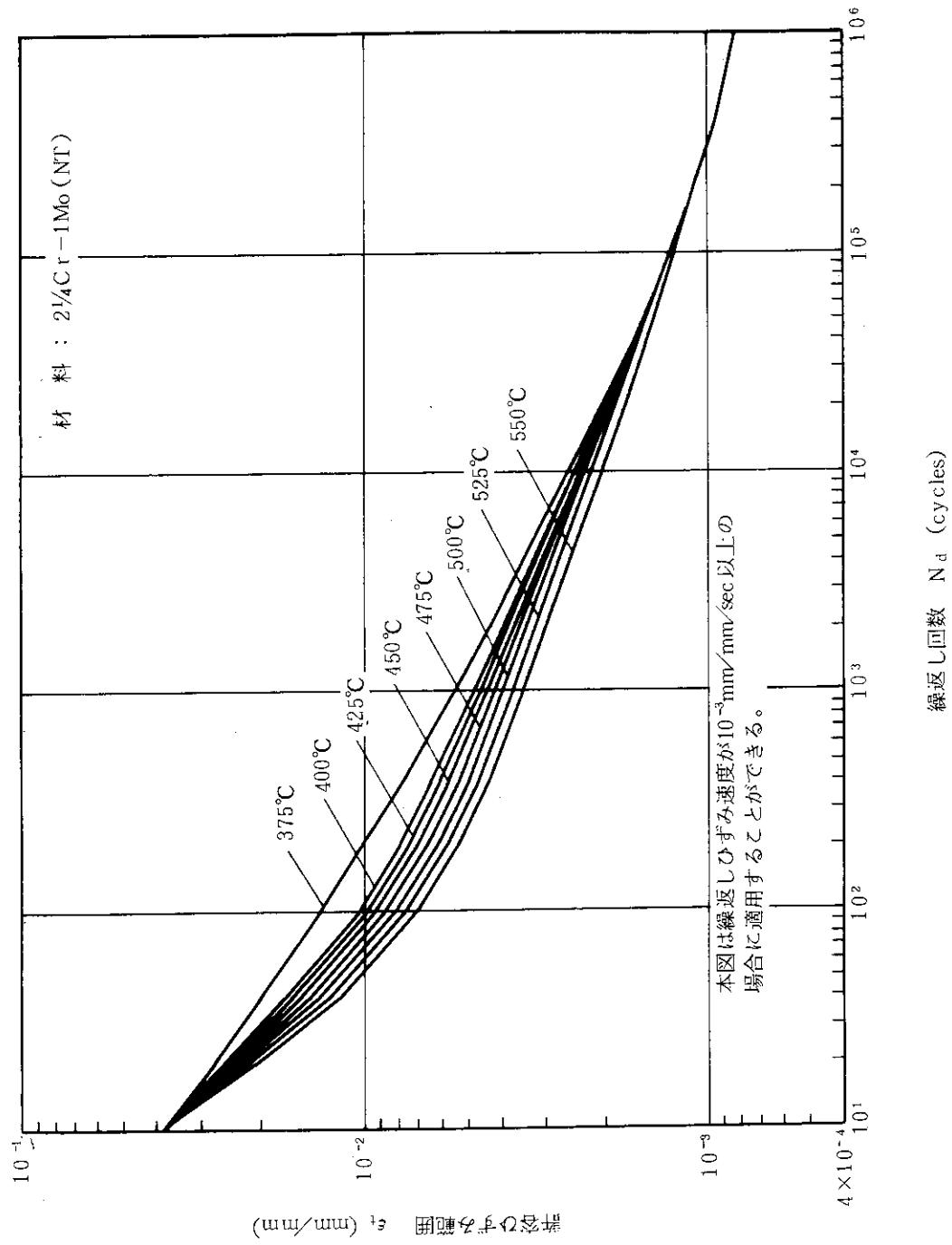
別図 1.7-(b) $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo(NT)}$ 配管の設計緩和強さ S_r (kg/mm^2)

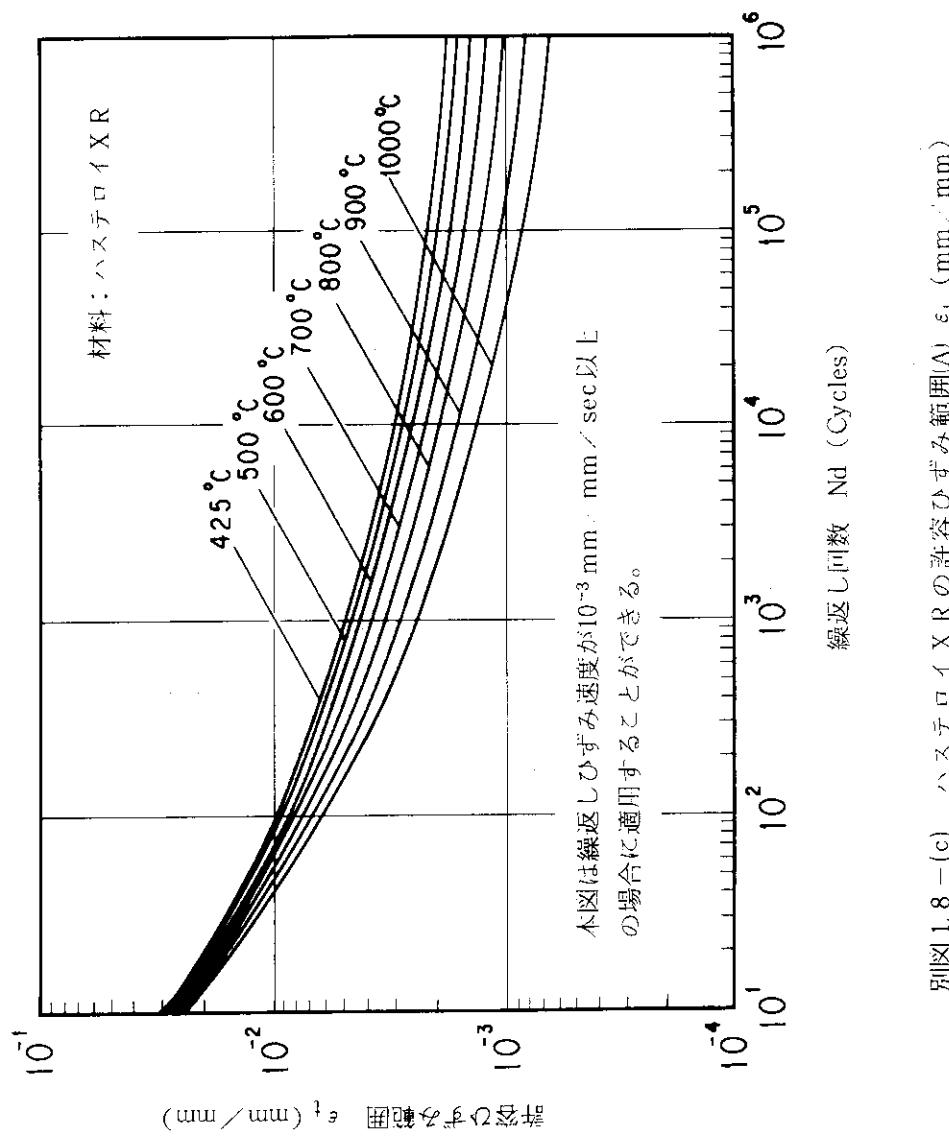


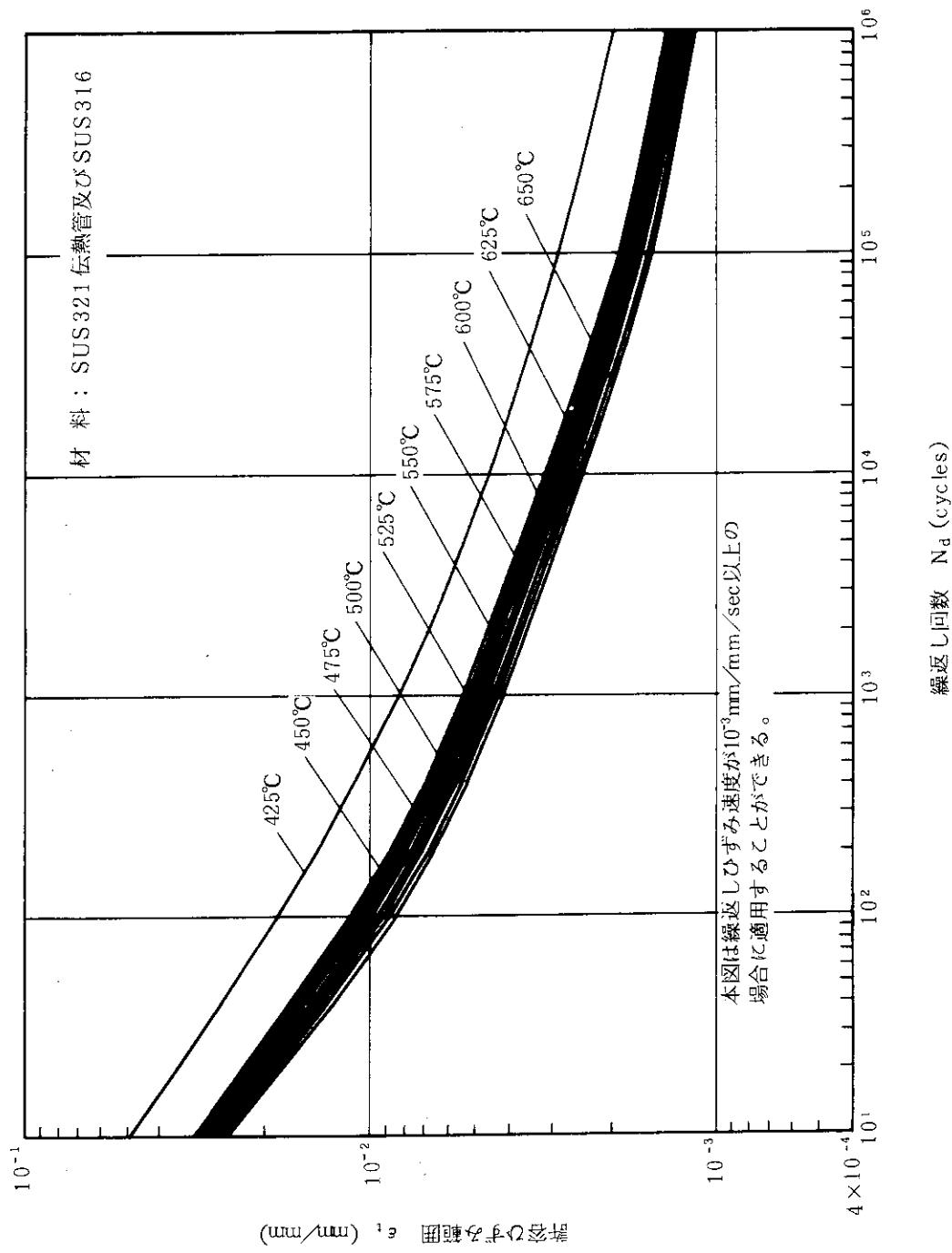
別図 1.7-(c) ハスチ ロイ XR の設計緩和強さ S_r (kg/mm²)

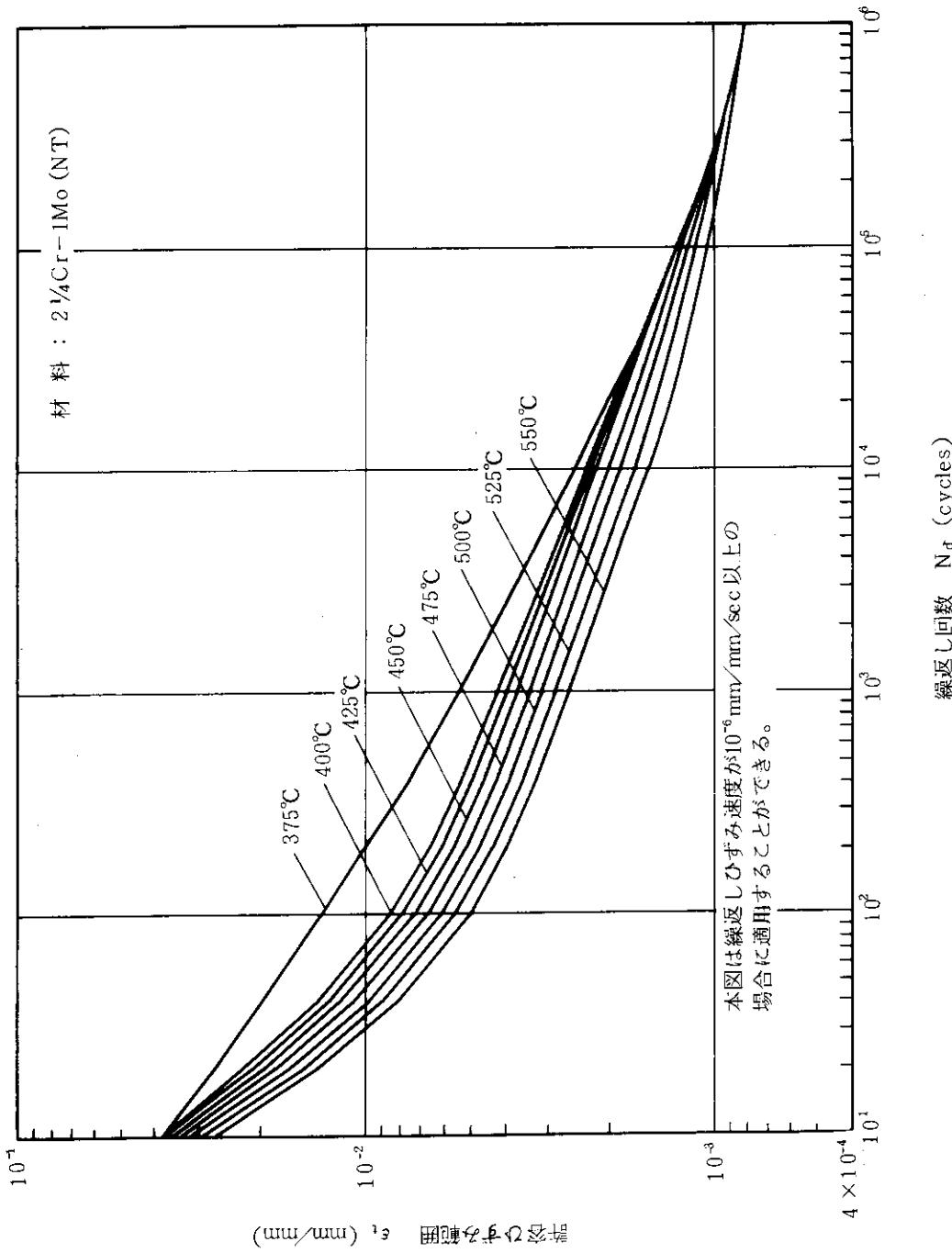
別図 1.7-(d) SUS 321 伝熱管の設計緩和強さ S_r (kg/mm²)

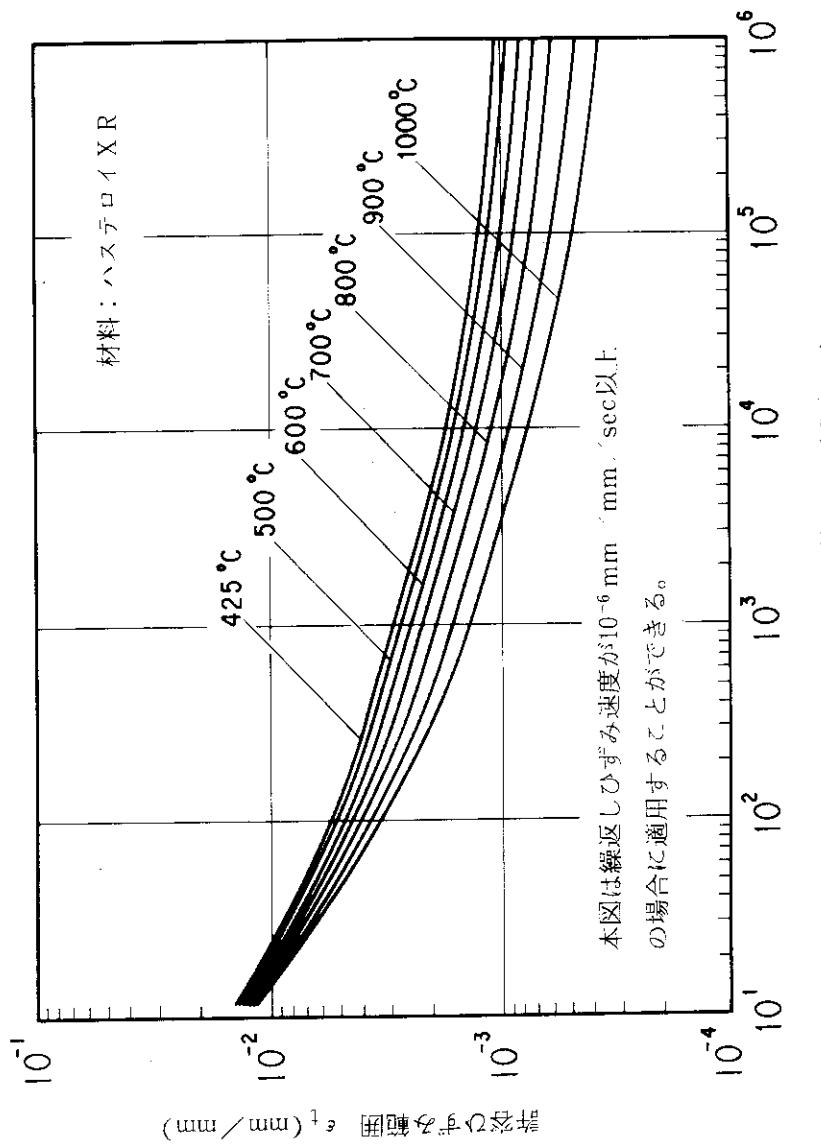
別図 1.7-(e) SUS 316 の設計緩和強さ S_r (kg/mm^2)

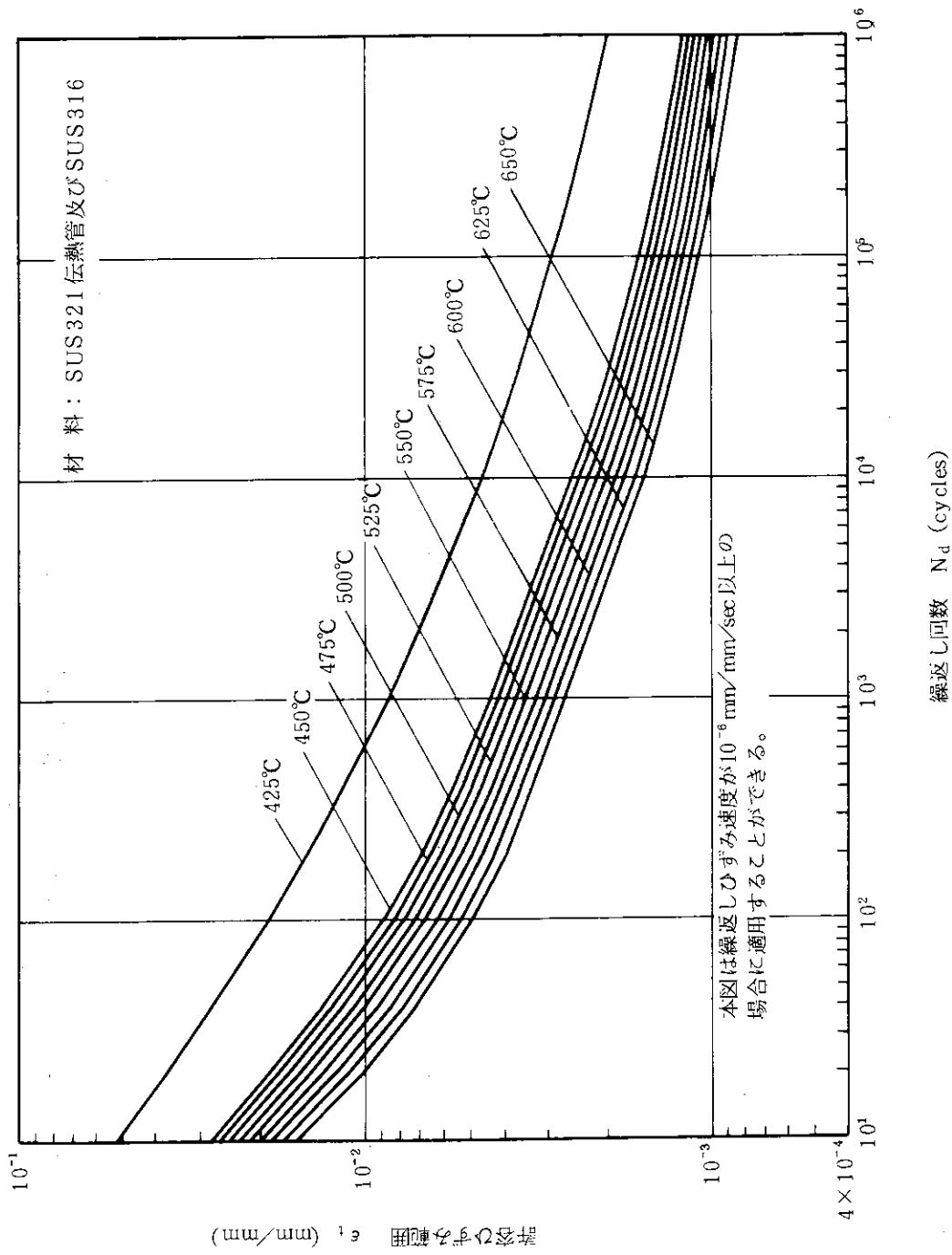
別図 1.8-(a), (b) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) の許容ひずみ範囲(A) $\dot{\epsilon}_t$ (mm/mm)

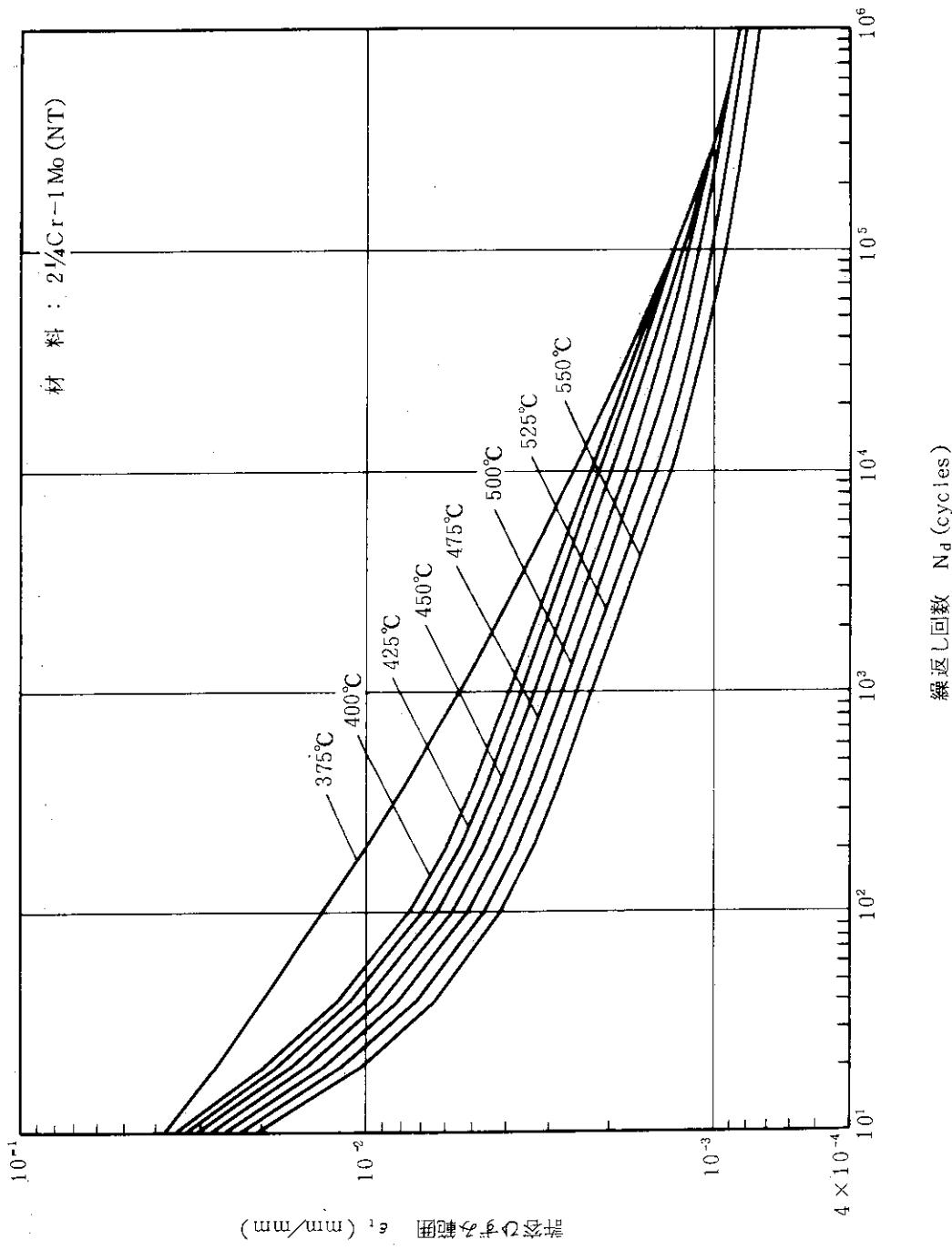
別図 1.8-(c) ハスティロイX R の許容ひずみ範囲(A) $\dot{\epsilon}_t$ (mm/mm)

別図 1.8-(d),(e) SUS 321 伝熱管及びSUS 316 の許容ひずみ範囲 (Δ) ϵ_t (mm/mm)

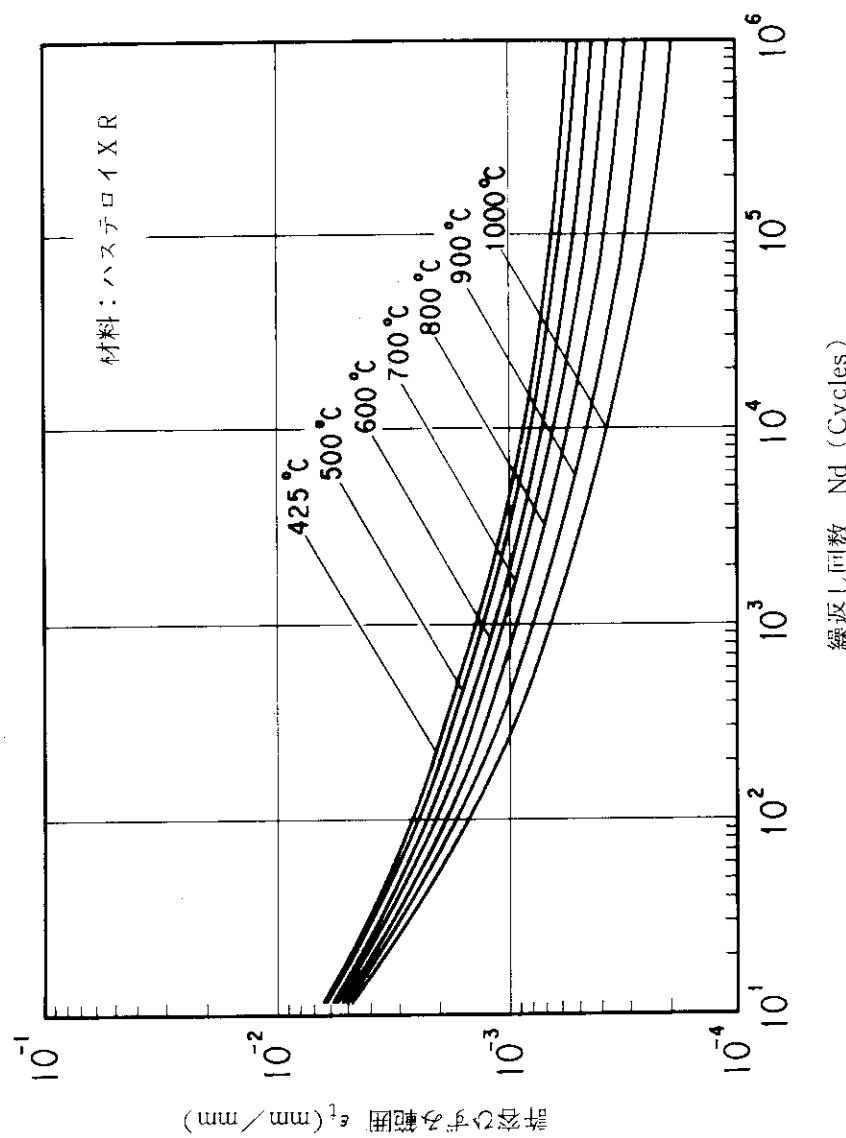
別図 1.9-(a),(b) 2 1/4 Cr - 1Mo (NT) の許容ひずみ範囲(B) $\dot{\epsilon}_t$ (mm/mm)

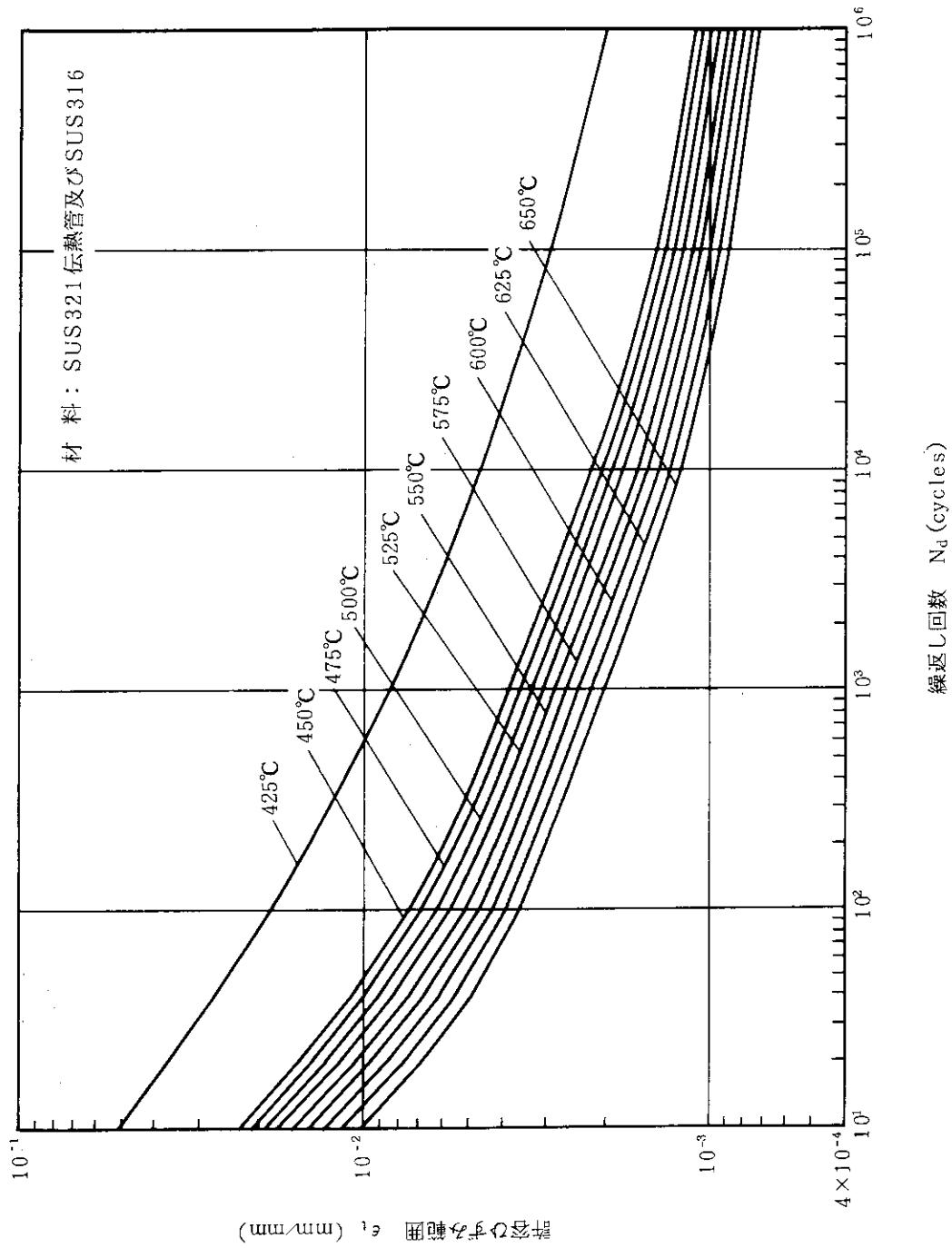
別図 1.9-(c) ハスティロイ X R の許容ひずみ範囲(B) $\dot{\epsilon}_t$ (mm/mm)

別図 1.9-(d),(e) SUS321 伝熱管及びSUS316 の許容ひずみ範囲(B) $\dot{\epsilon}_t$ (mm/min)

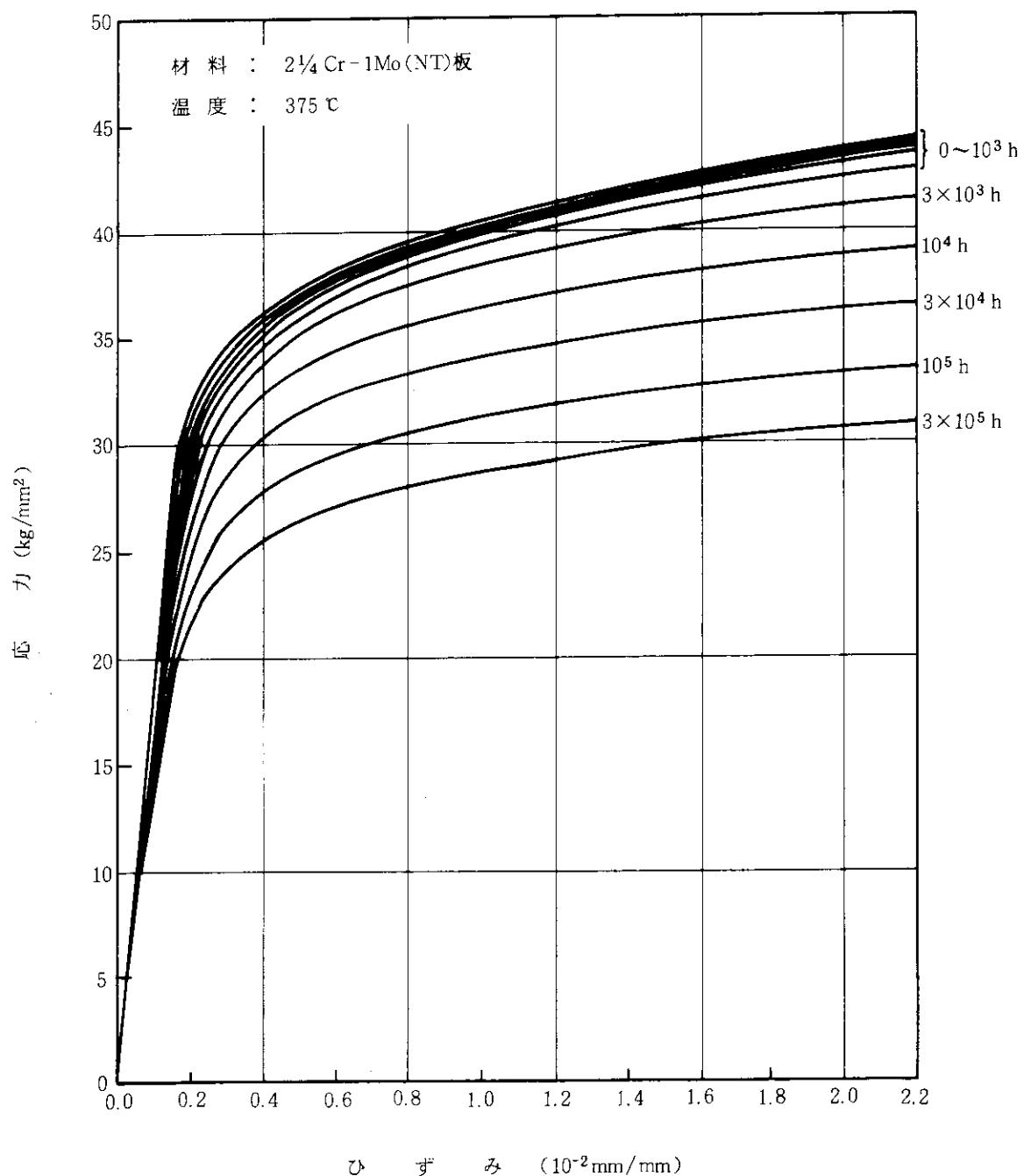


別図 1.10-(a), (b) 2 1/4 Cr - 1 Mo (NT) の許容ひずみ範囲 (C) ϵ_t (mm/mm)

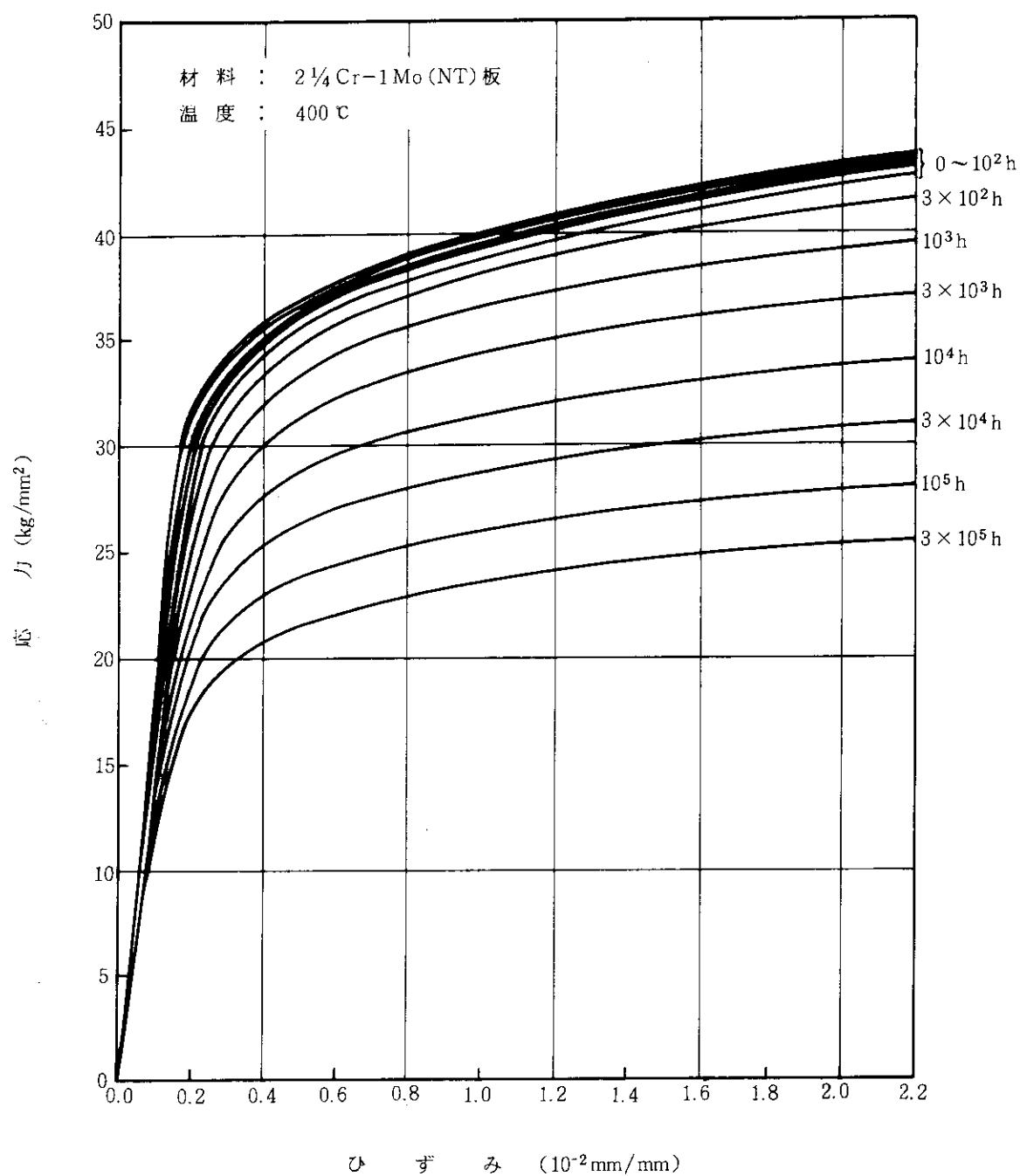
別図 1.10-(c) ハスティロイ X R の許容ひずみ範囲(C) ε_t (mm / mm)



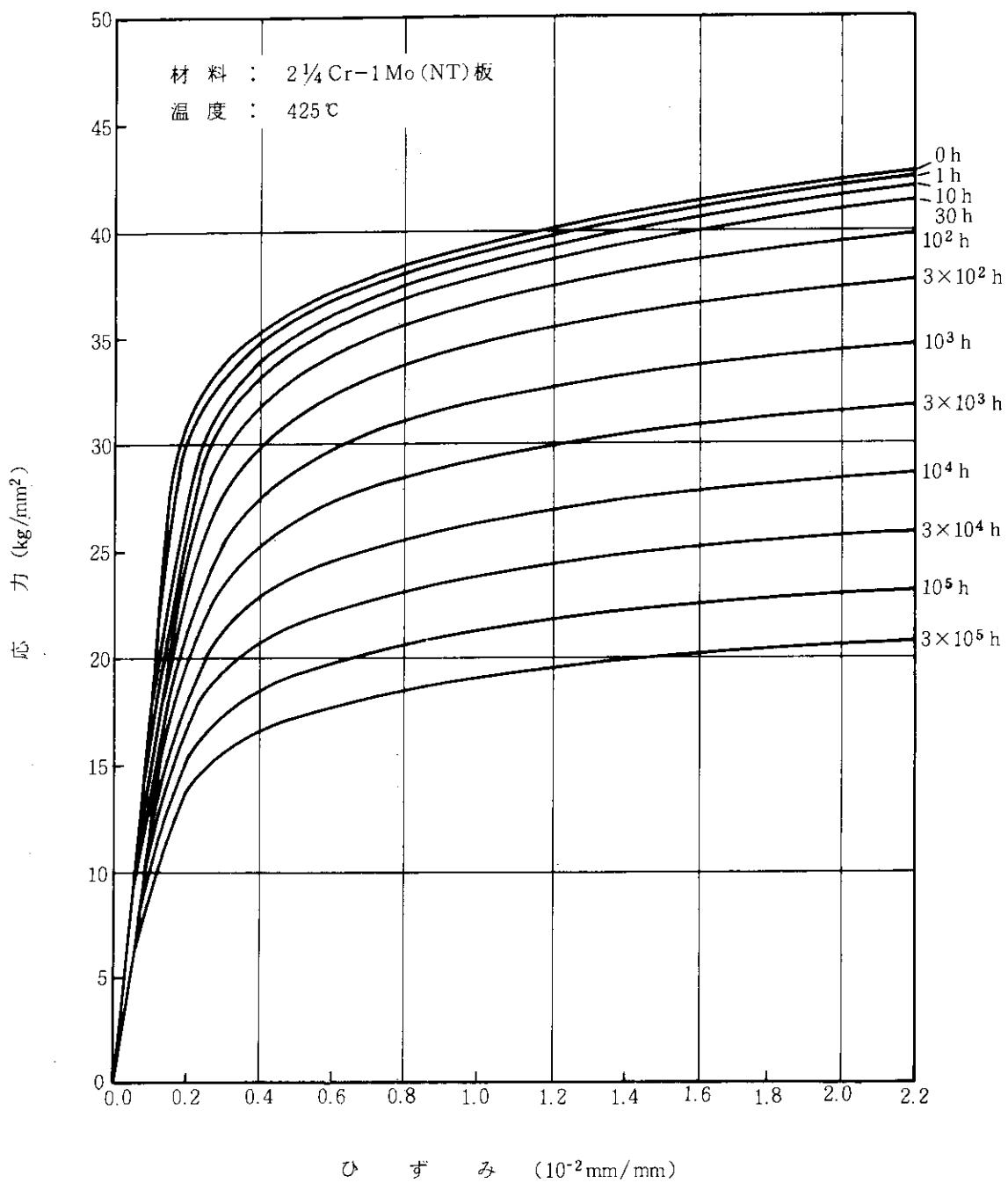
別図1.10-(d),(e) SUS321伝熱管及びSUS316の許容ひずみ範囲(C) $\dot{\epsilon}_t$ (mm/mm)



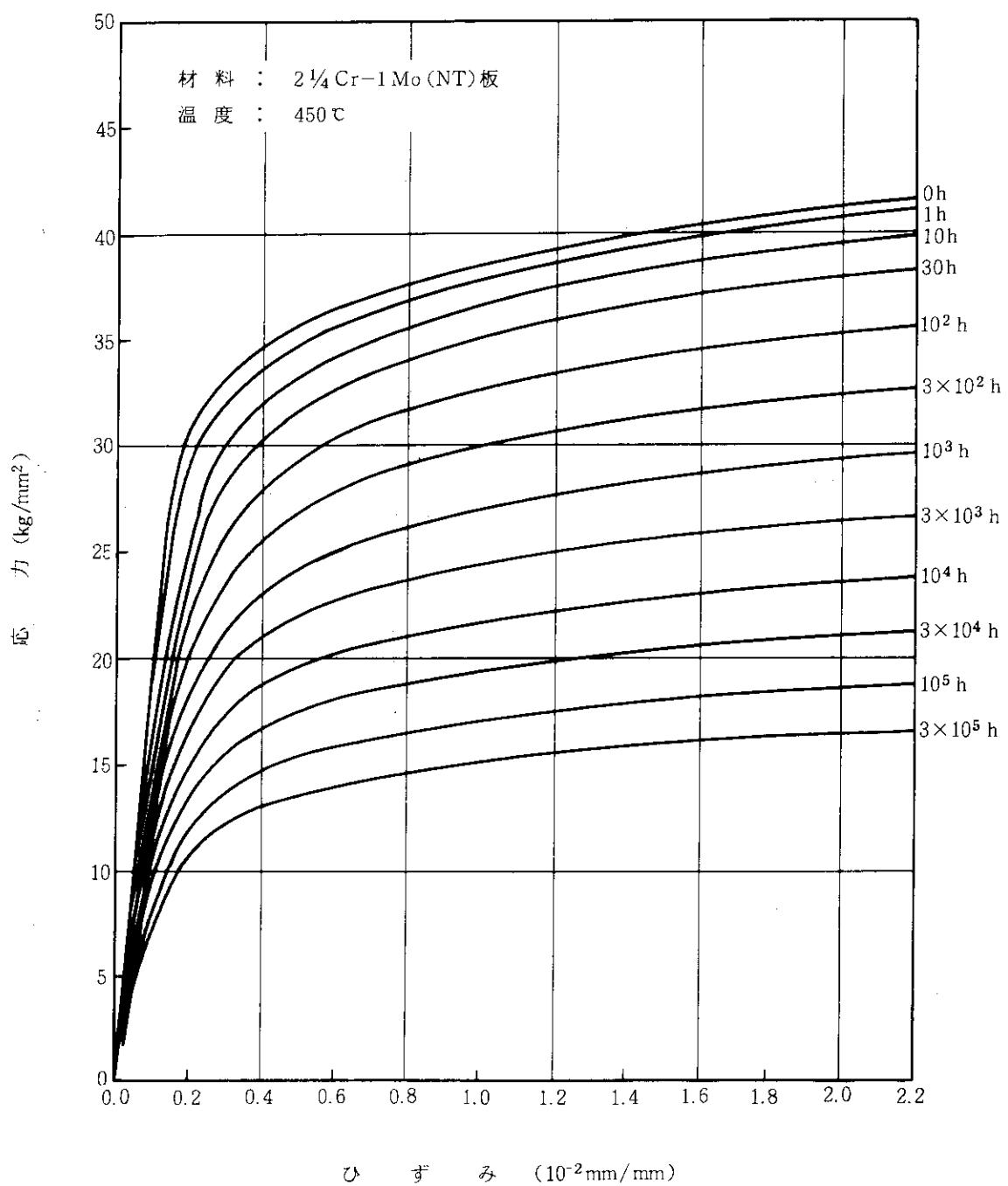
別図1.11-(a)(1) 2 1/4 Cr-1 Mo(NT)板の等時応力-ひずみ線図



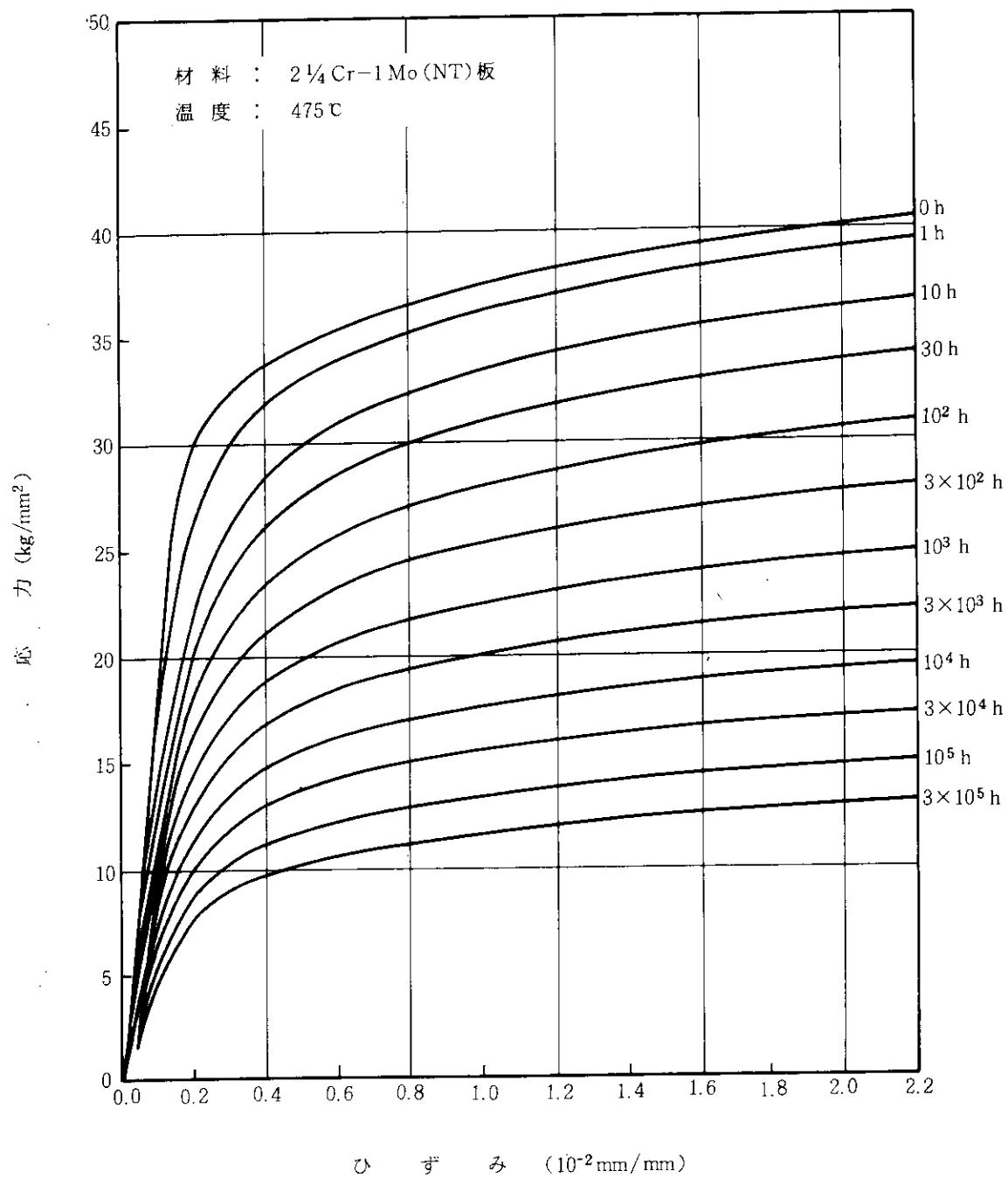
別図1.11-(a)(2) 2 1/4 Cr-1 Mo(NT)板の等時応力-ひずみ線図



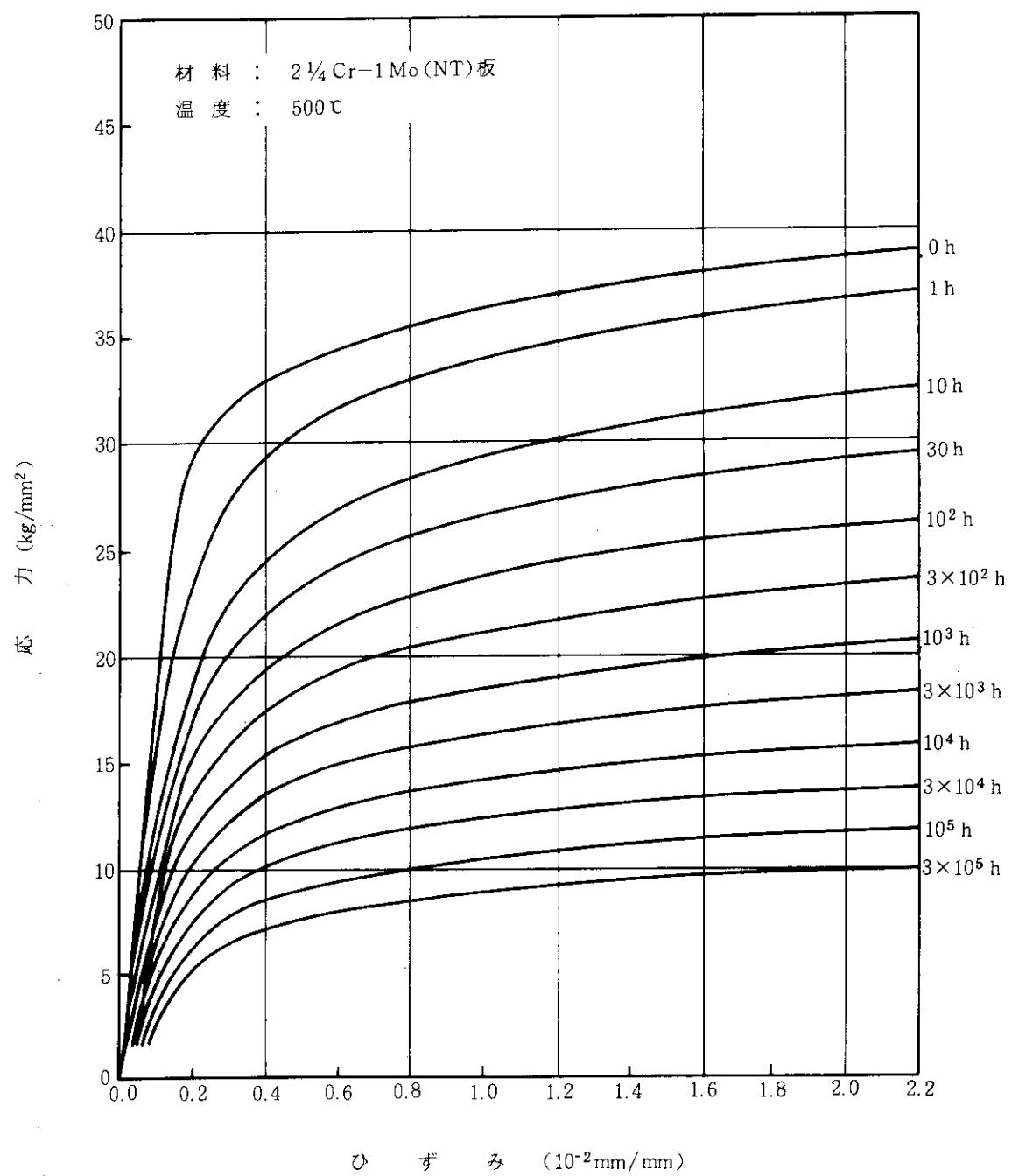
別図1.11-(a)(3) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板の等時応力-ひずみ線図



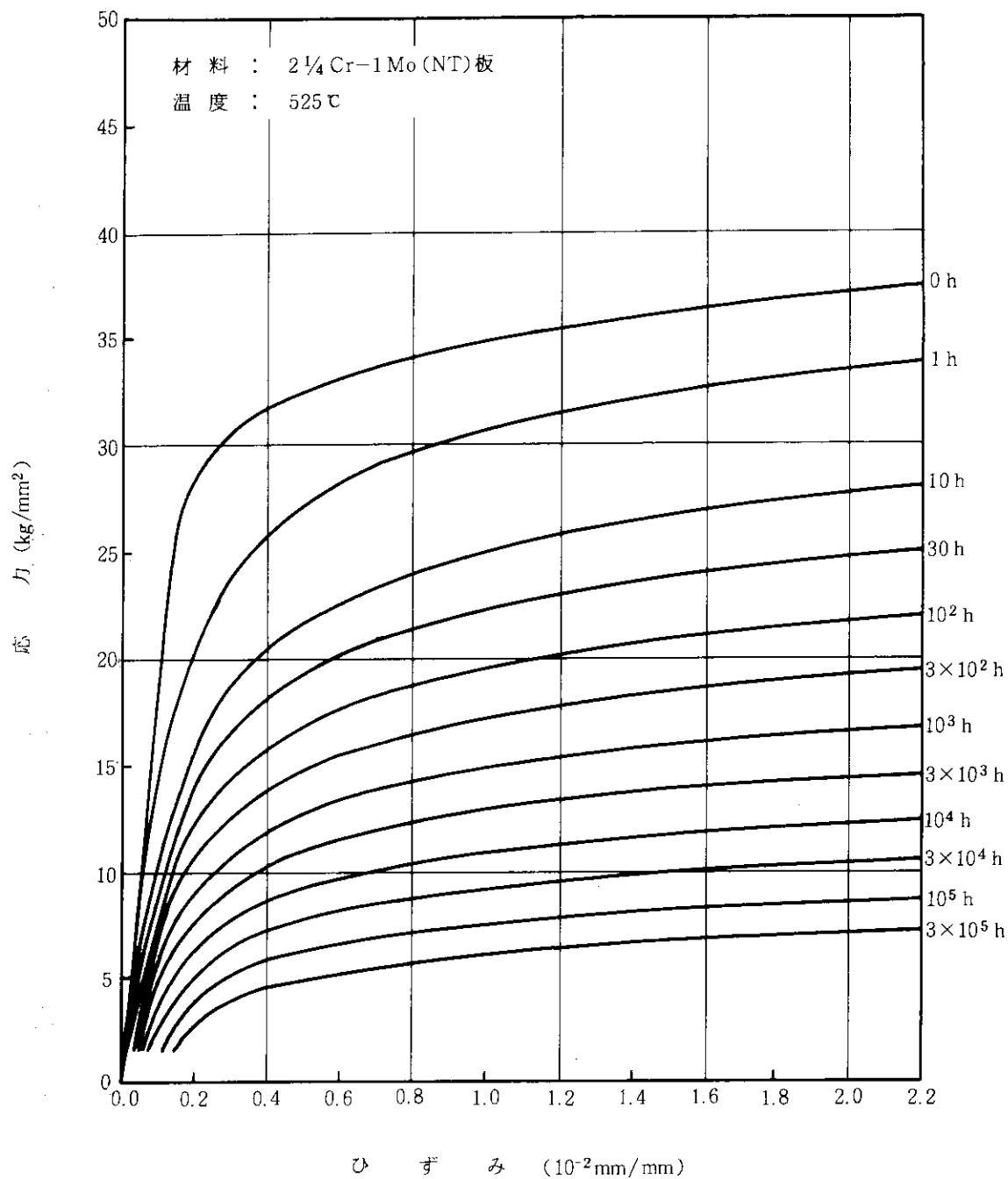
別図1.11-(a)(4) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板の等時応力-ひずみ線図



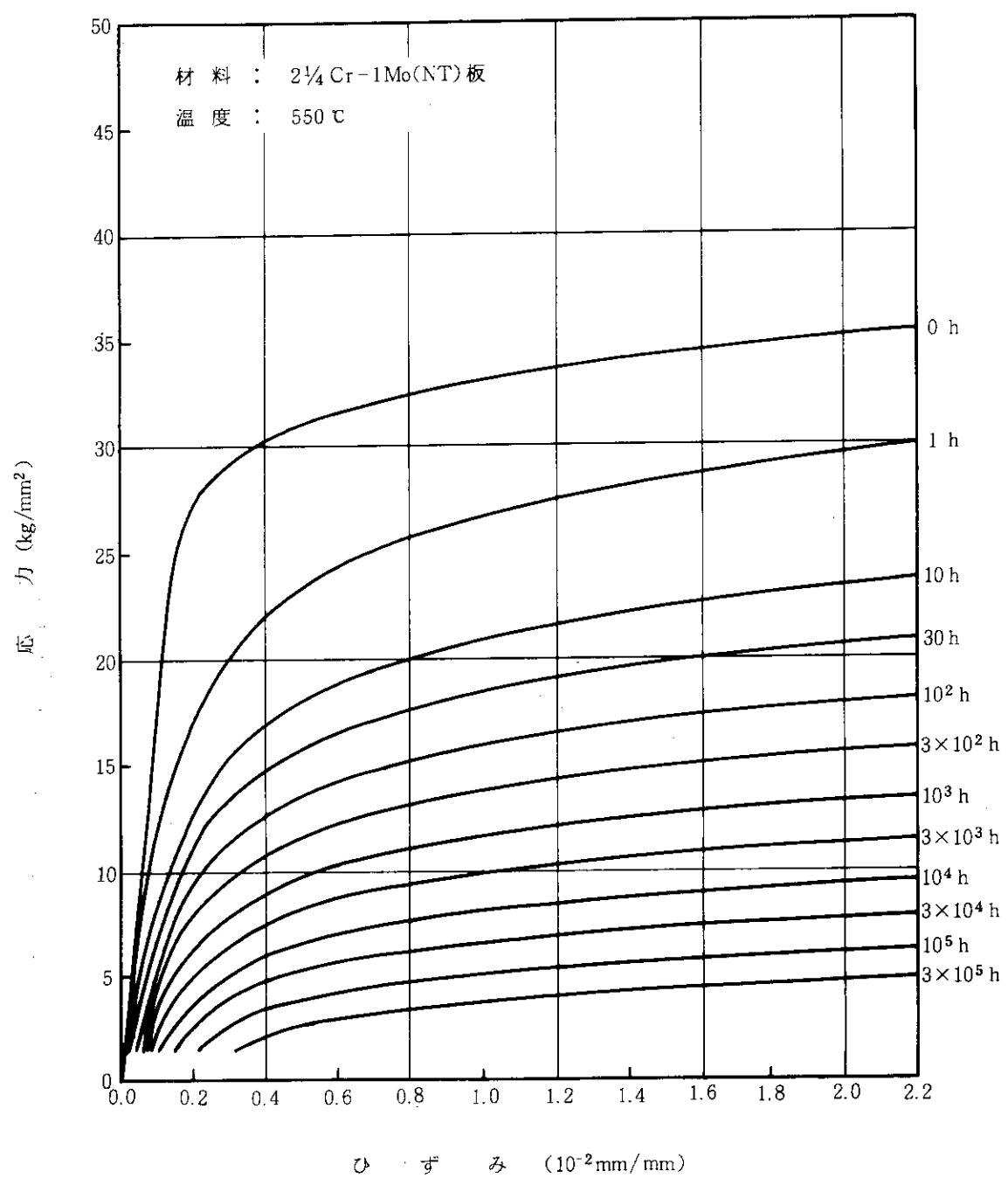
別図1.11-(a)(5) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板の等時応力-ひずみ線図



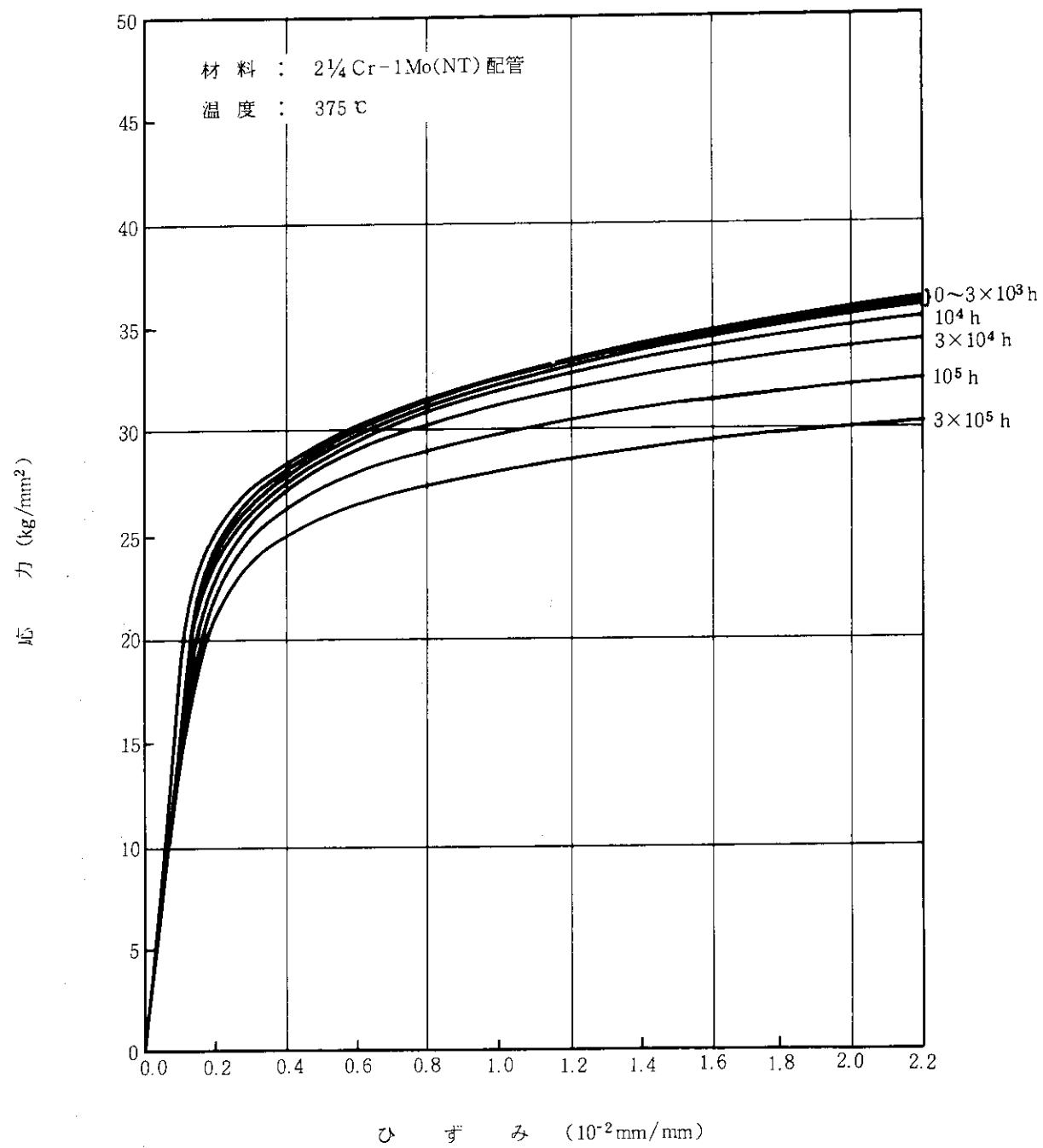
別図1.11-(a)(6) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 板の等時応力-ひずみ線図



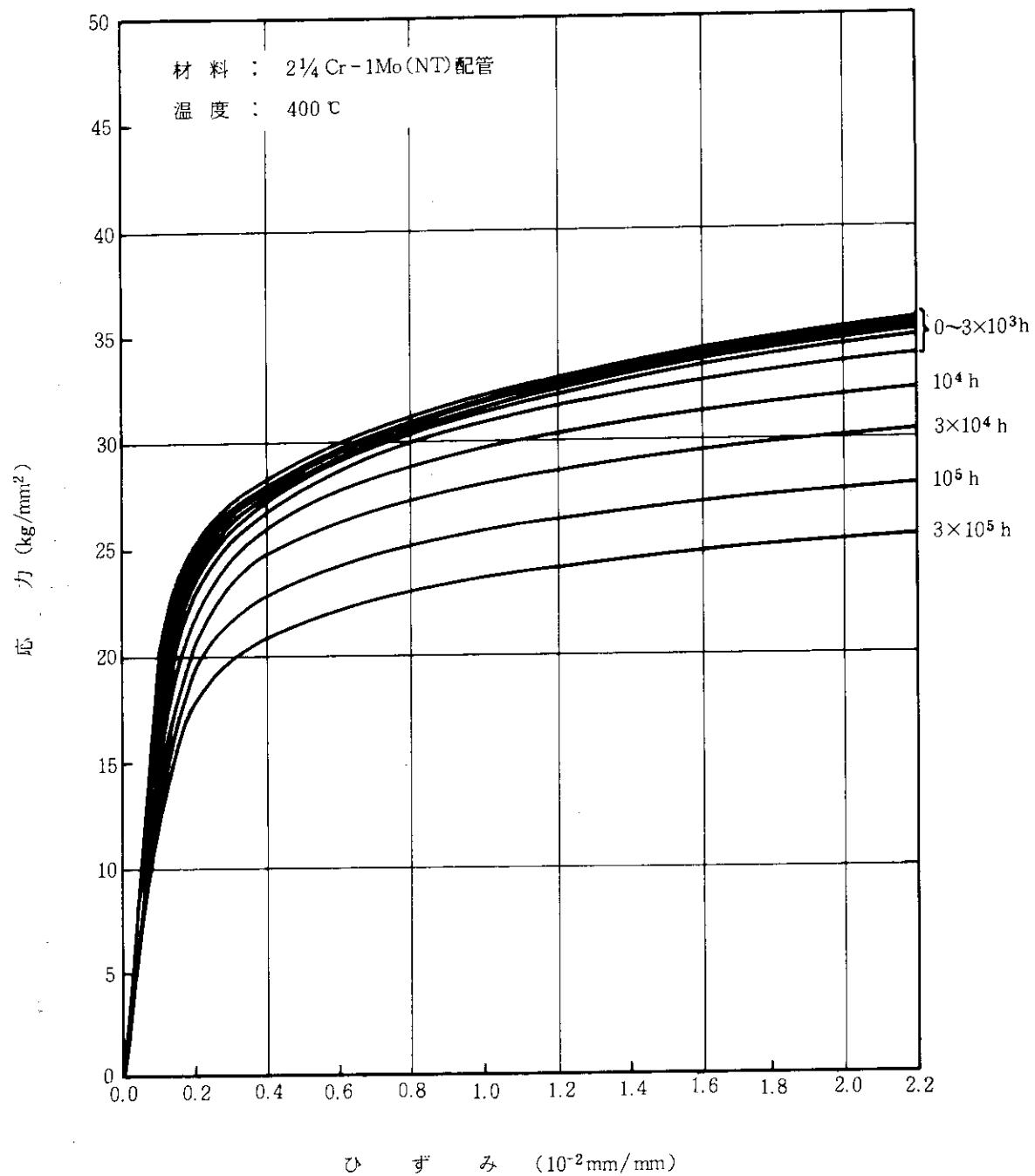
別図1.11-(a)(7) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT)板の等時応力-ひずみ線図



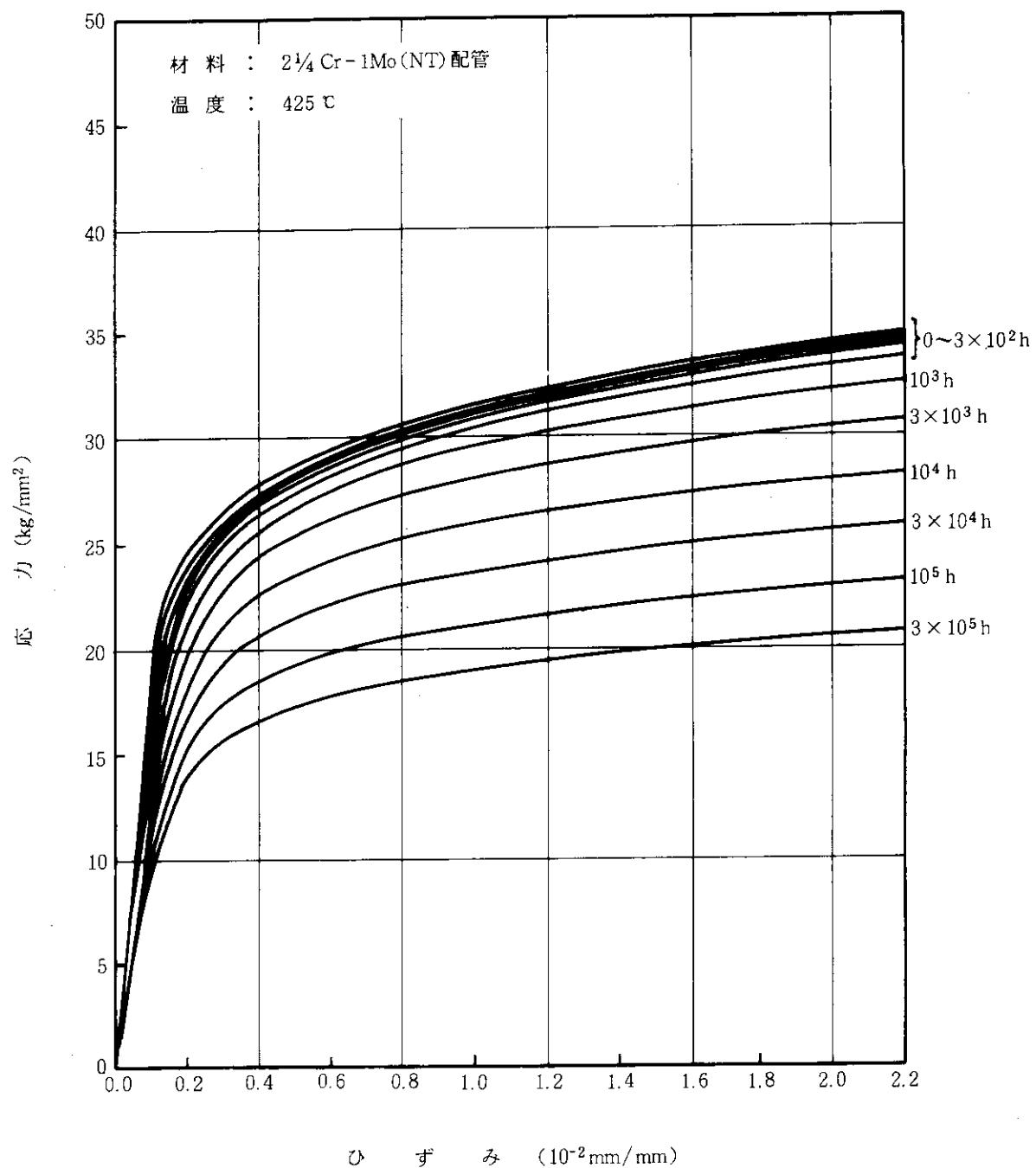
別図1.11-(a)(8) 2 1/4 Cr-1 Mo(NT) 板の等時応力-ひずみ線図



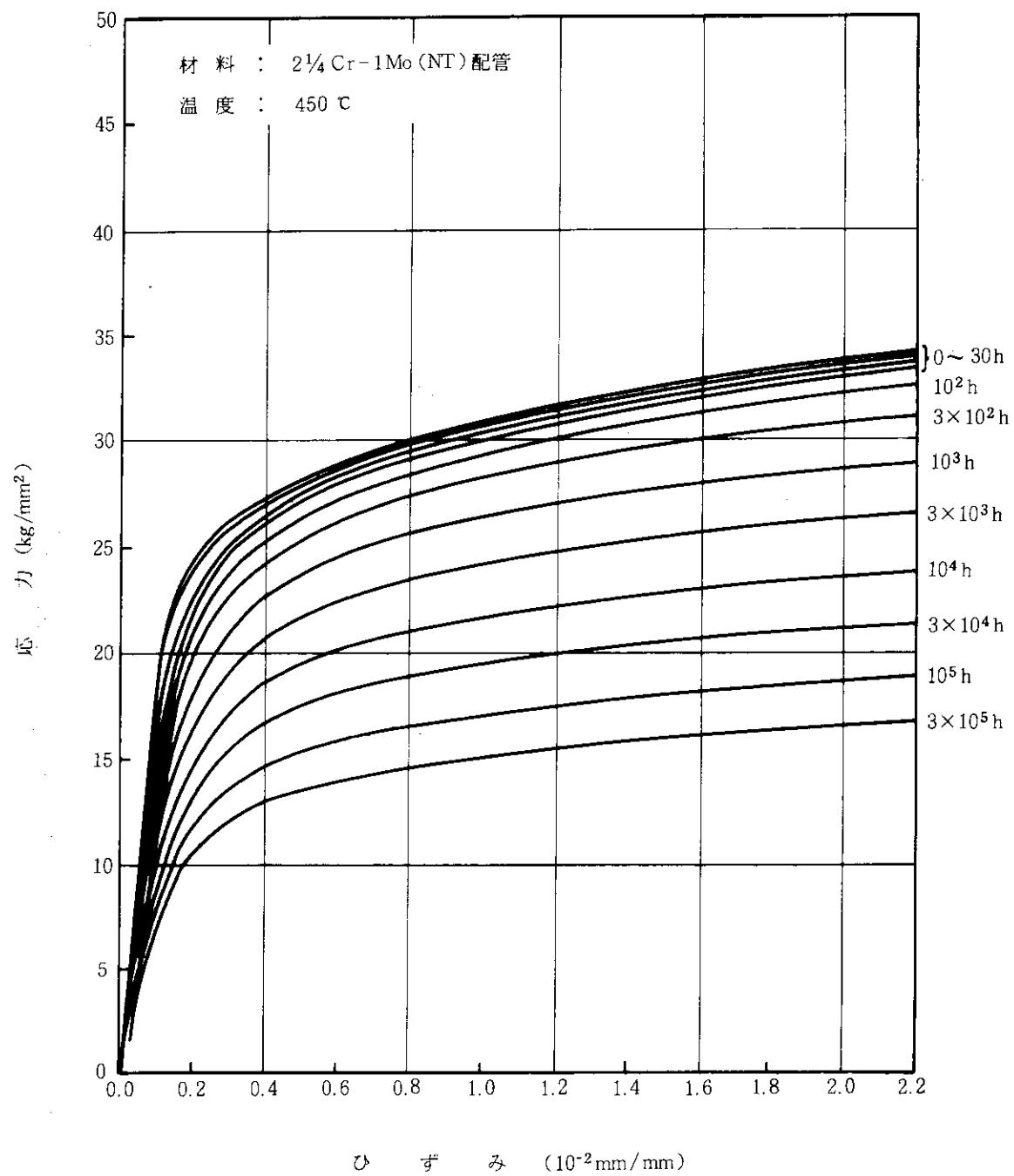
別図1.11-(b)(1) 2 1/4 Cr-1 Mo(NT) 配管の等時応力-ひずみ線図



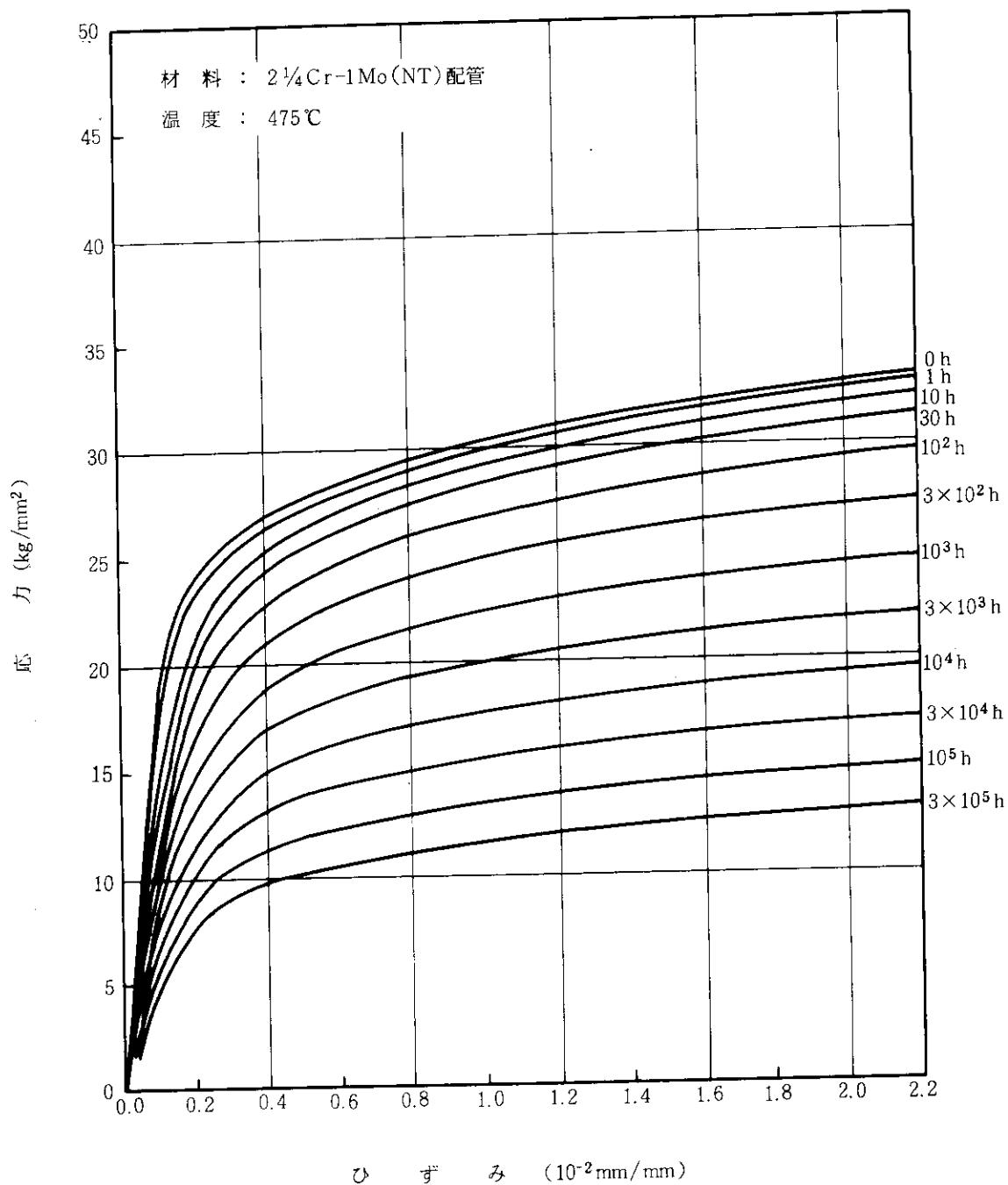
別図1.11-(b)(2) 2 1/4 Cr-1Mo(NT)配管の等時応力-ひずみ線図



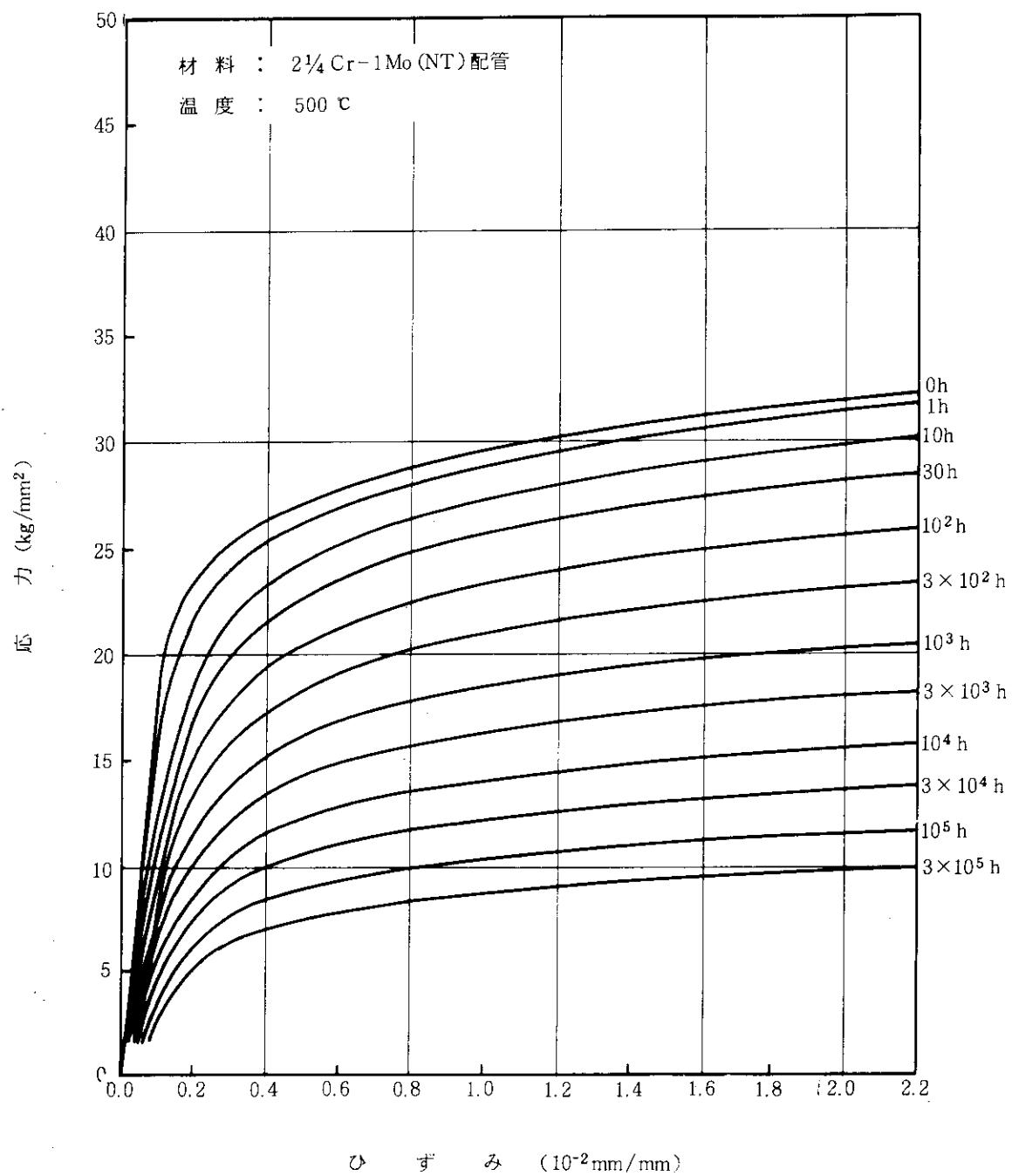
別図1.11-(b)(3) 2 1/4 Cr - 1Mo (NT) 配管の等時応力-ひずみ線図



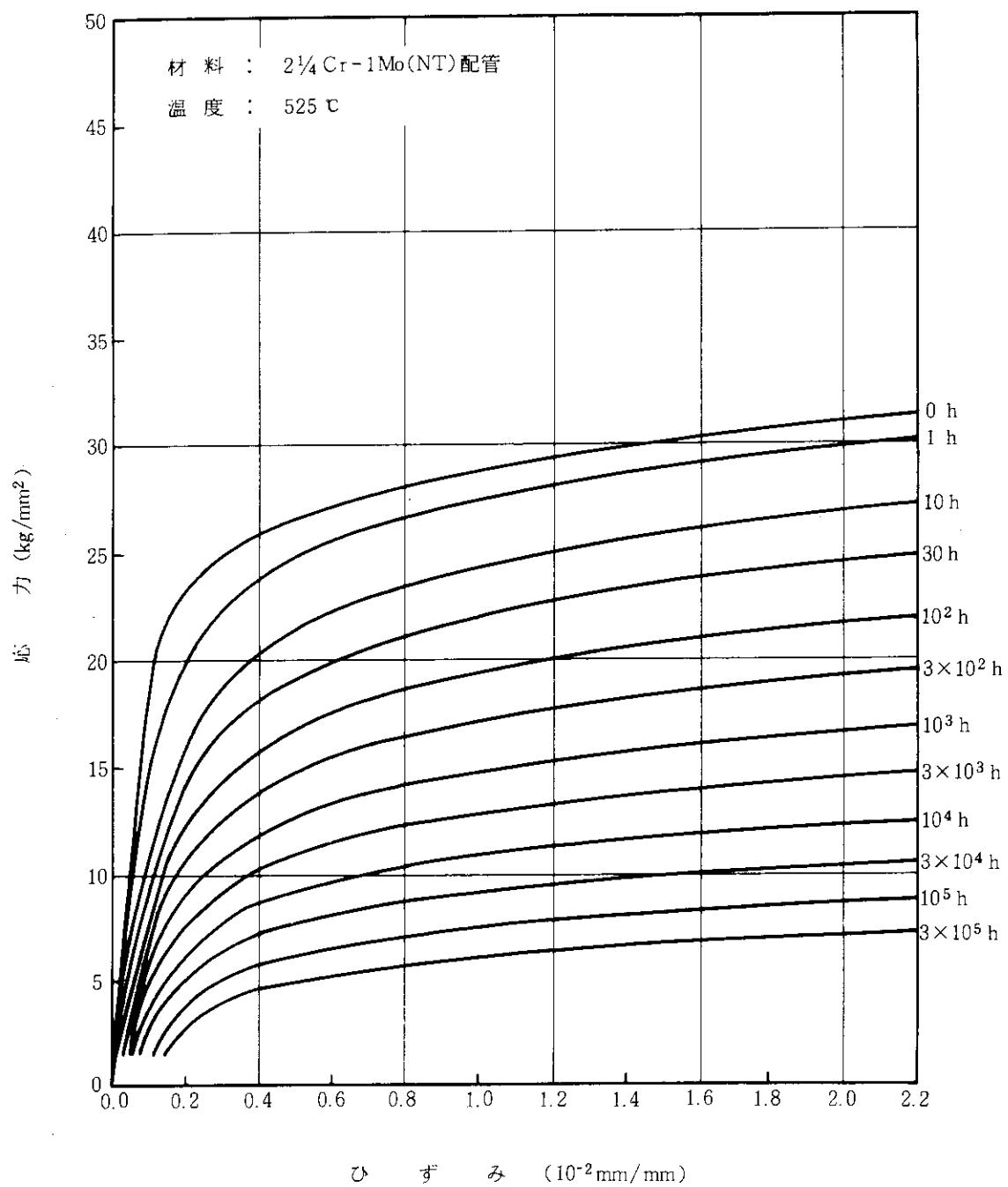
別図1.11-(b)(4) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管の等時応力-ひずみ線図



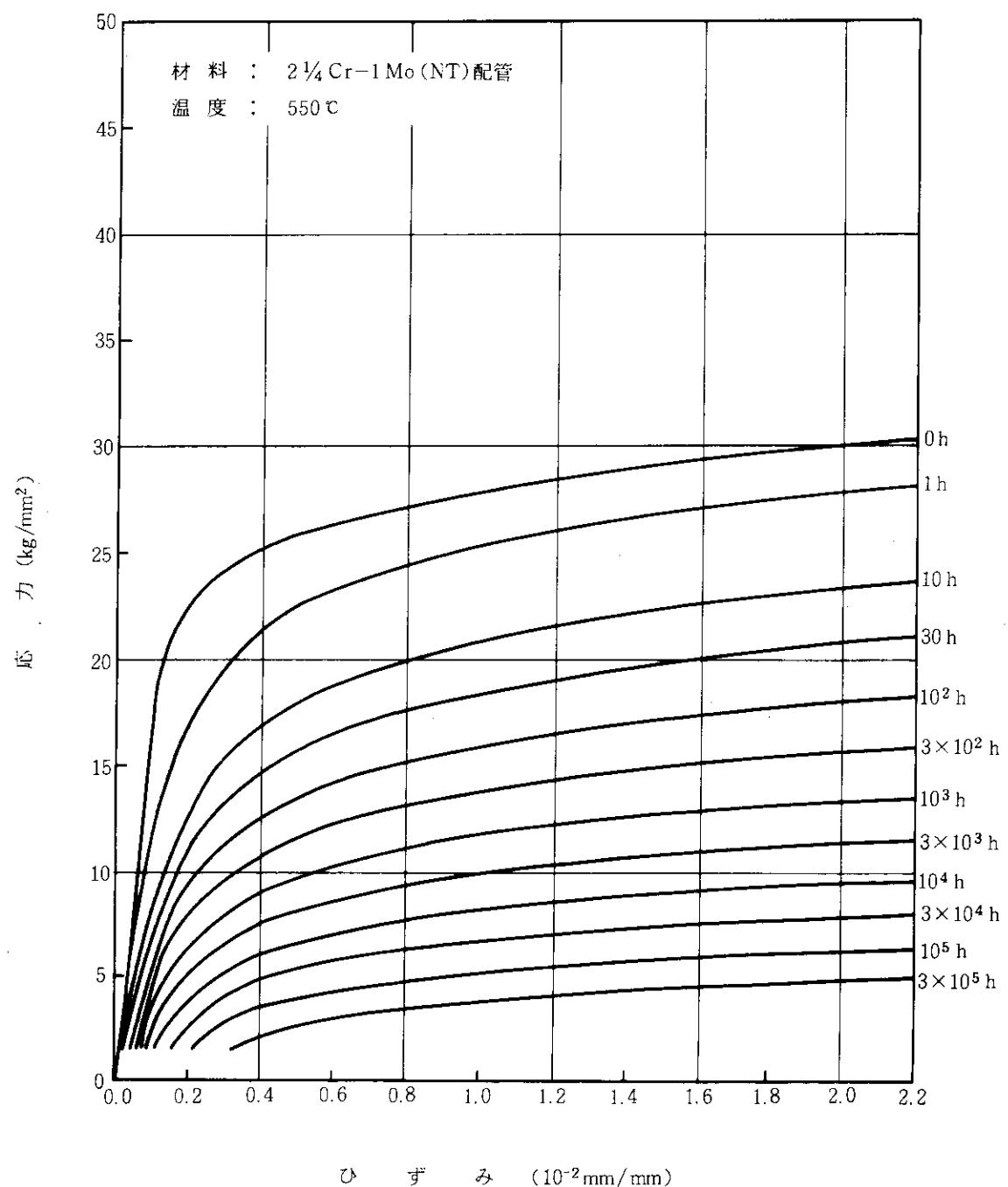
別図1.11-(b)(5) 2 1/4 Cr-1 Mo(NT) 配管の等時応力-ひずみ線図



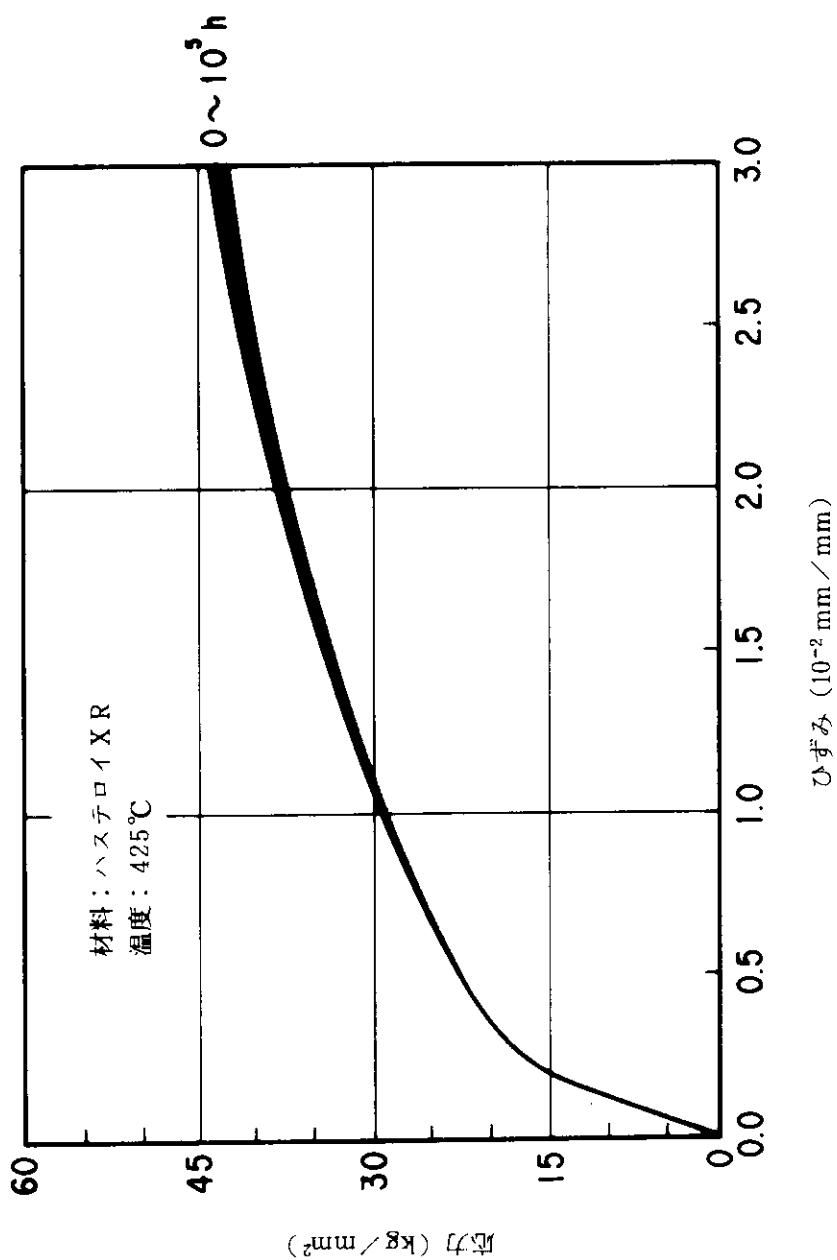
別図1.11-(b)(6) 2 1/4 Cr-1 Mo(NT) 配管の等時応力-ひずみ線図



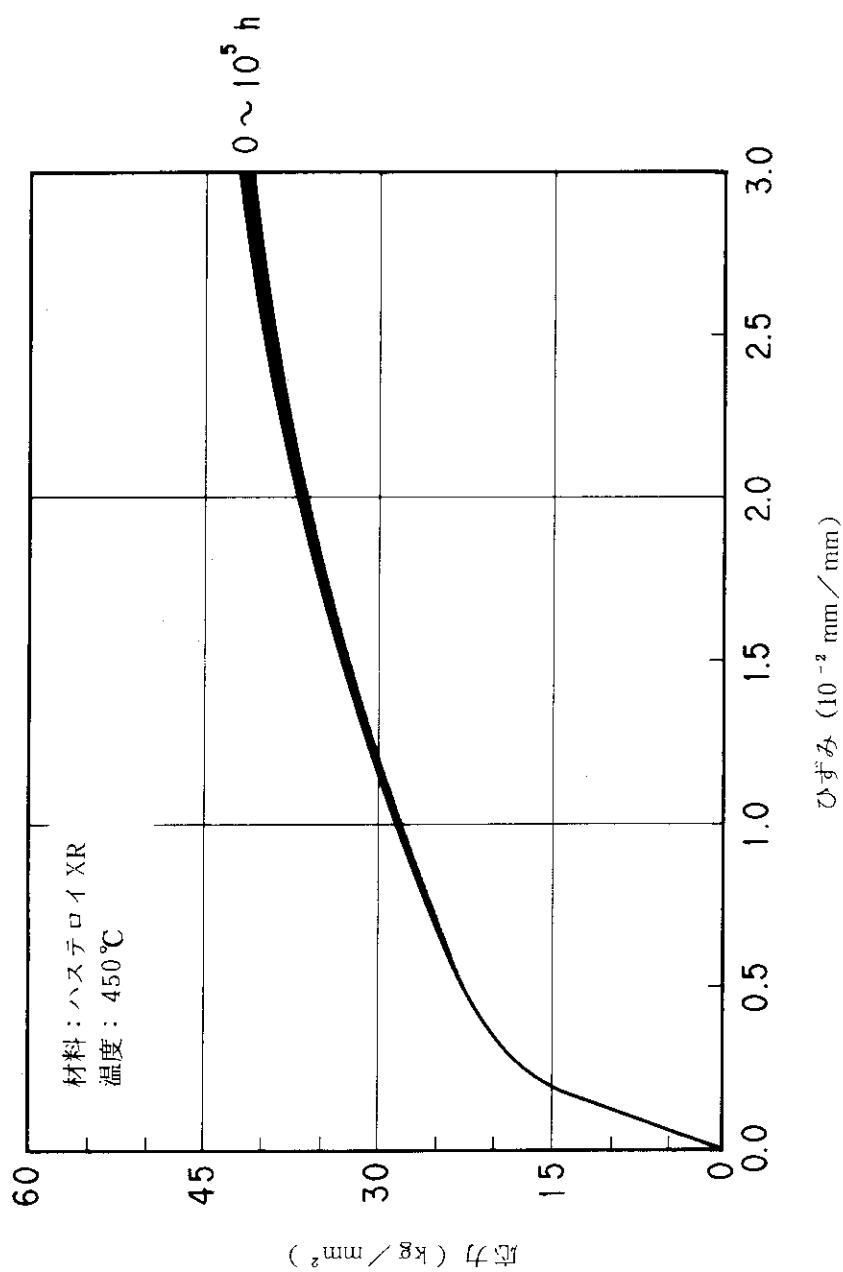
別図1.11-(b)(7) 2 1/4 Cr-1 Mo(NT) 配管の等時応力-ひずみ線図



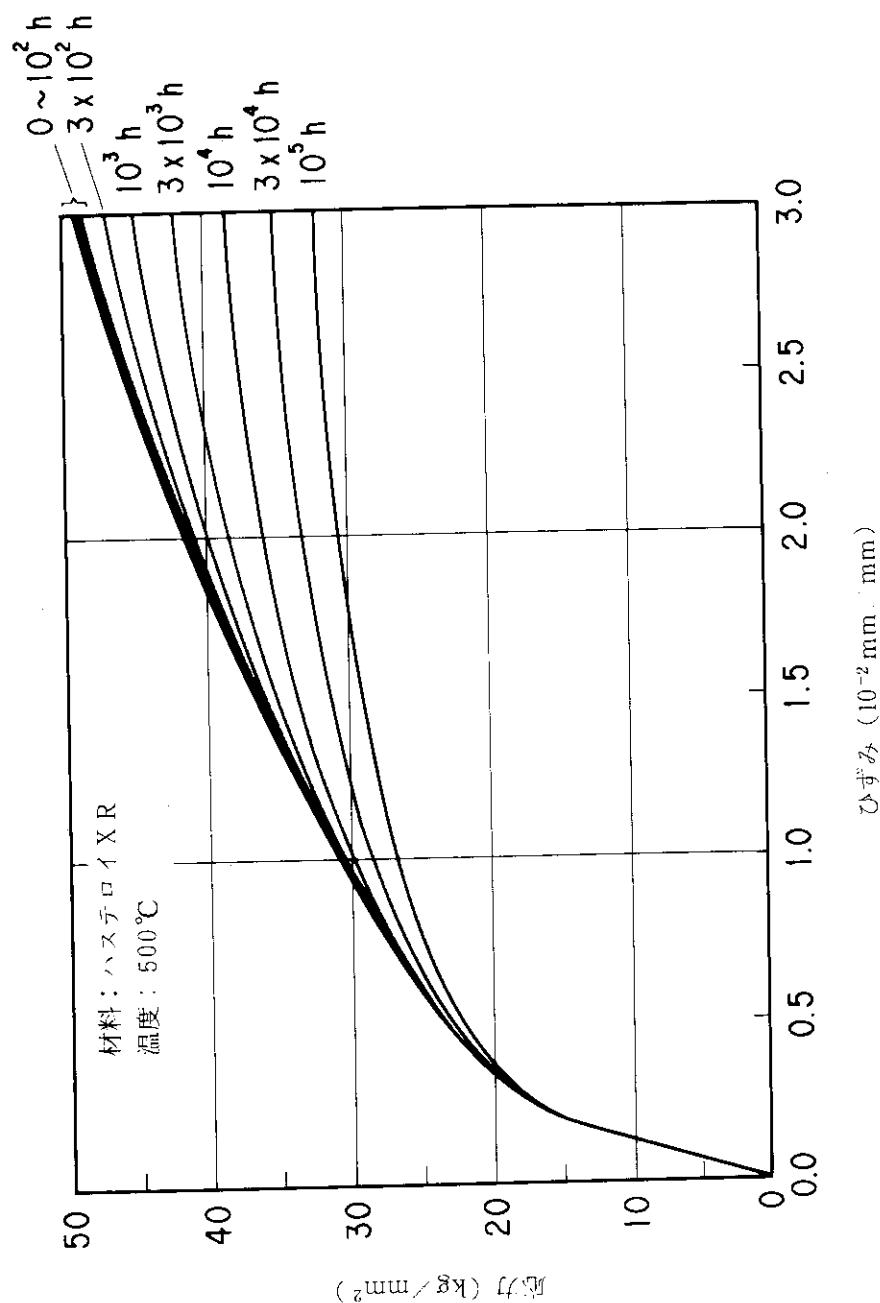
別図 1.11-(b)(8) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管の等時応力-ひずみ線図



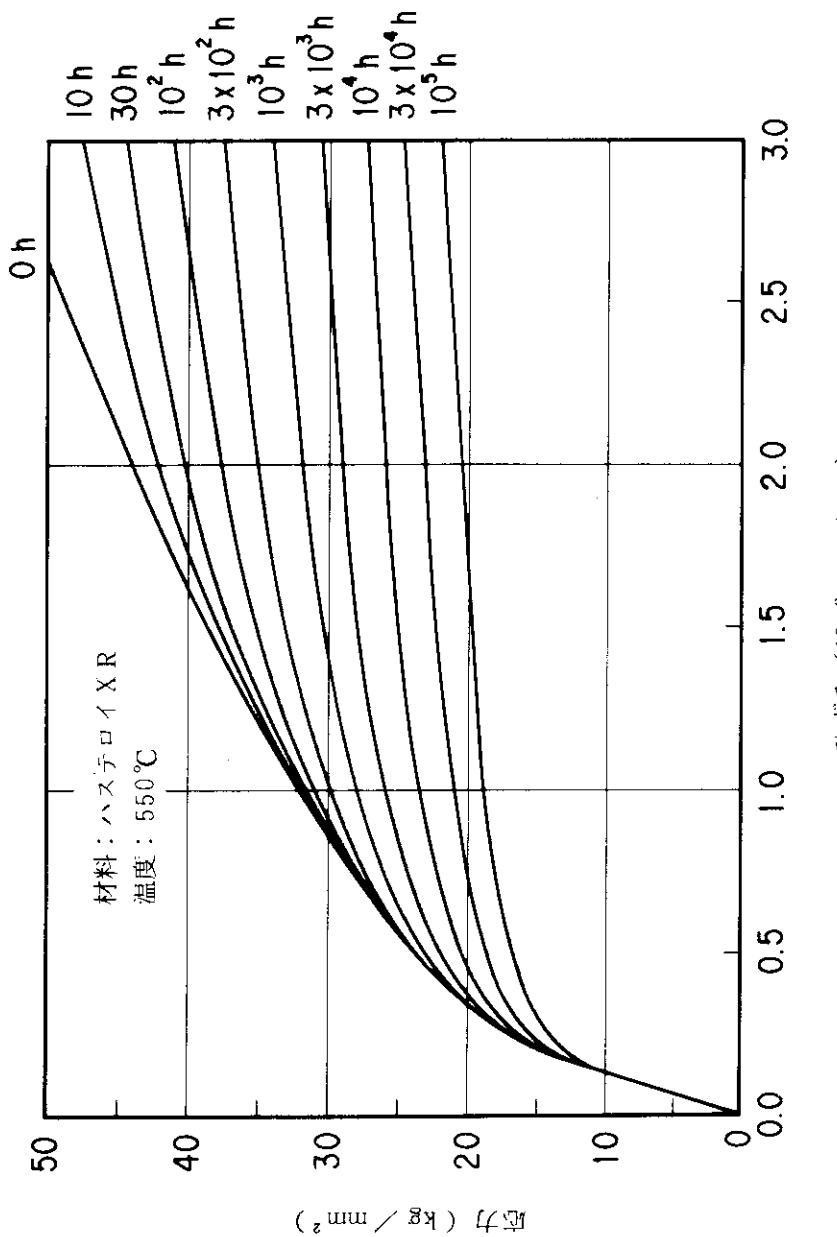
別図 1.11-(C)(1) ハスティロイ X R の等時応力 - ひずみ線図



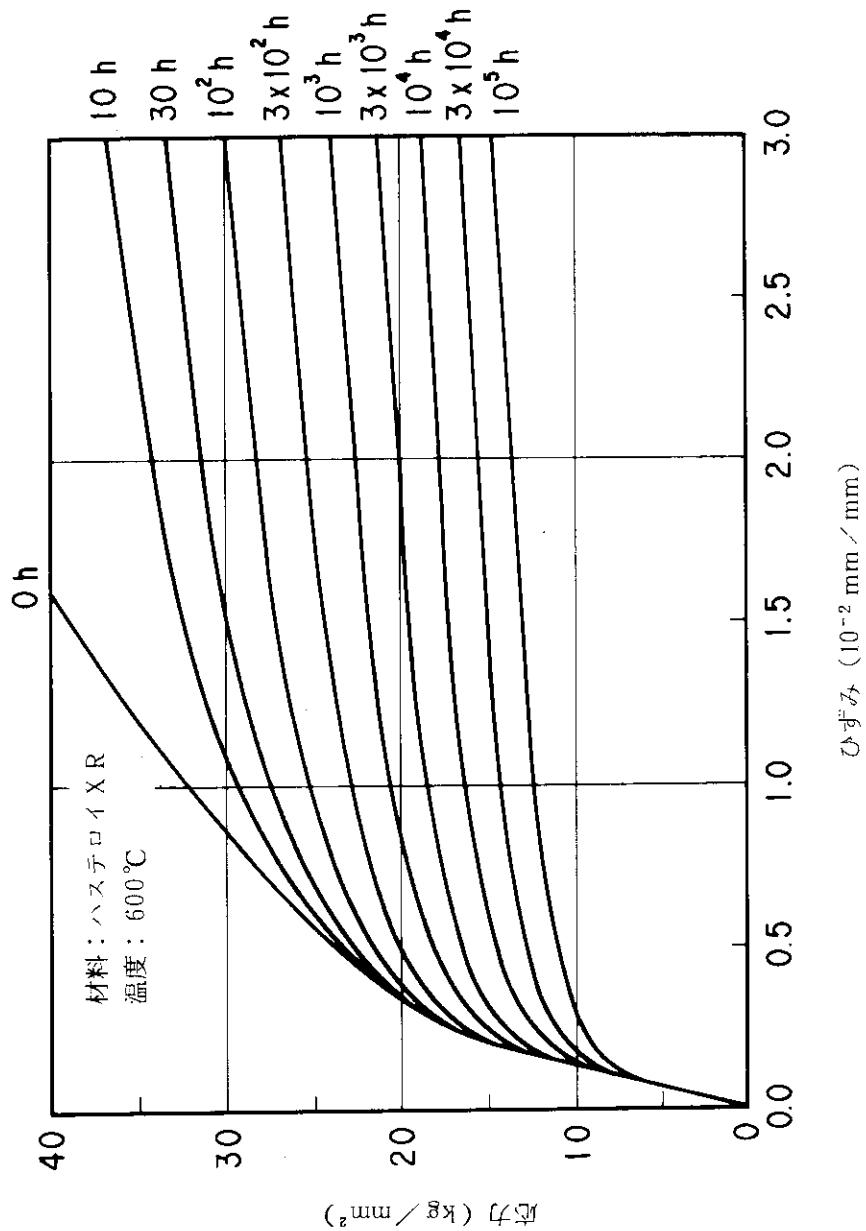
別図 1.11-(C)(2) ハスティロイ XR の等時応力 - ひずみ線図



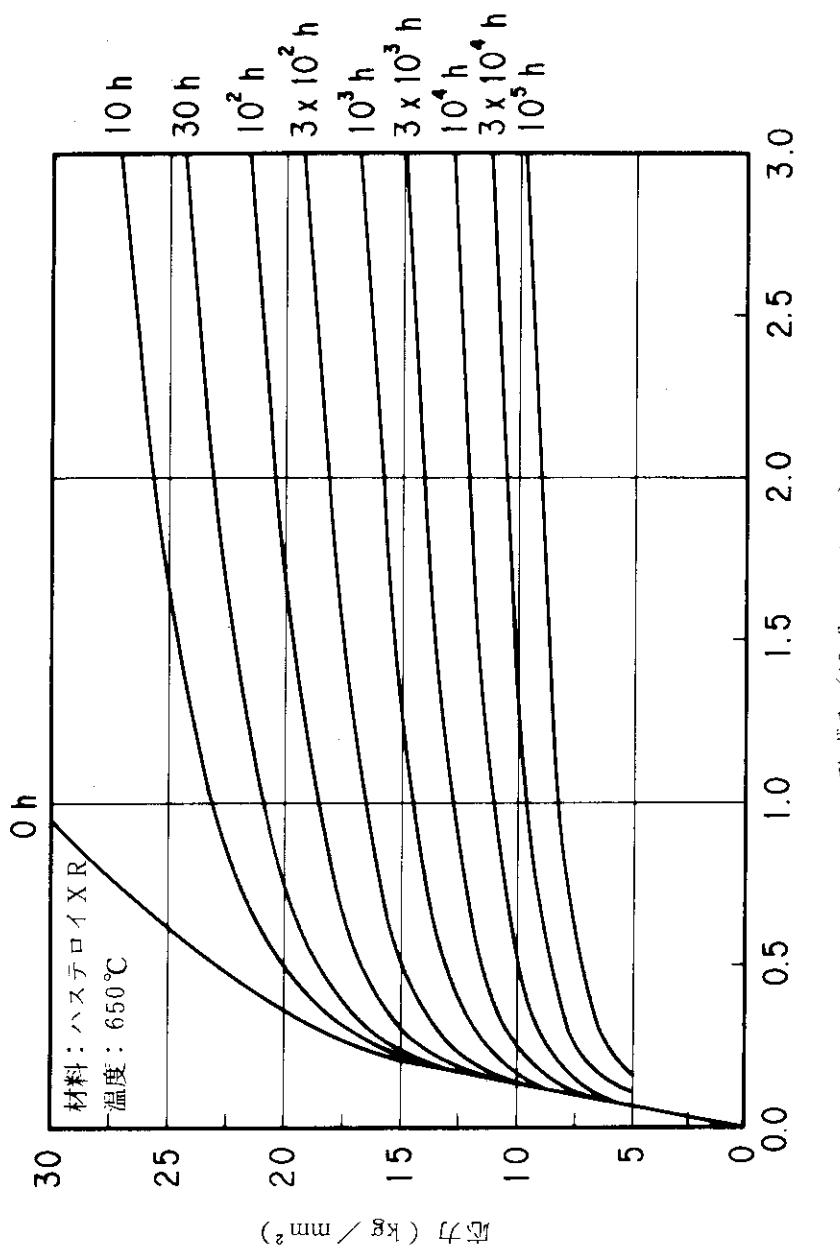
別図 1.11 (C)(3) ハスティロイ X R の等時応力 - ひずみ線図



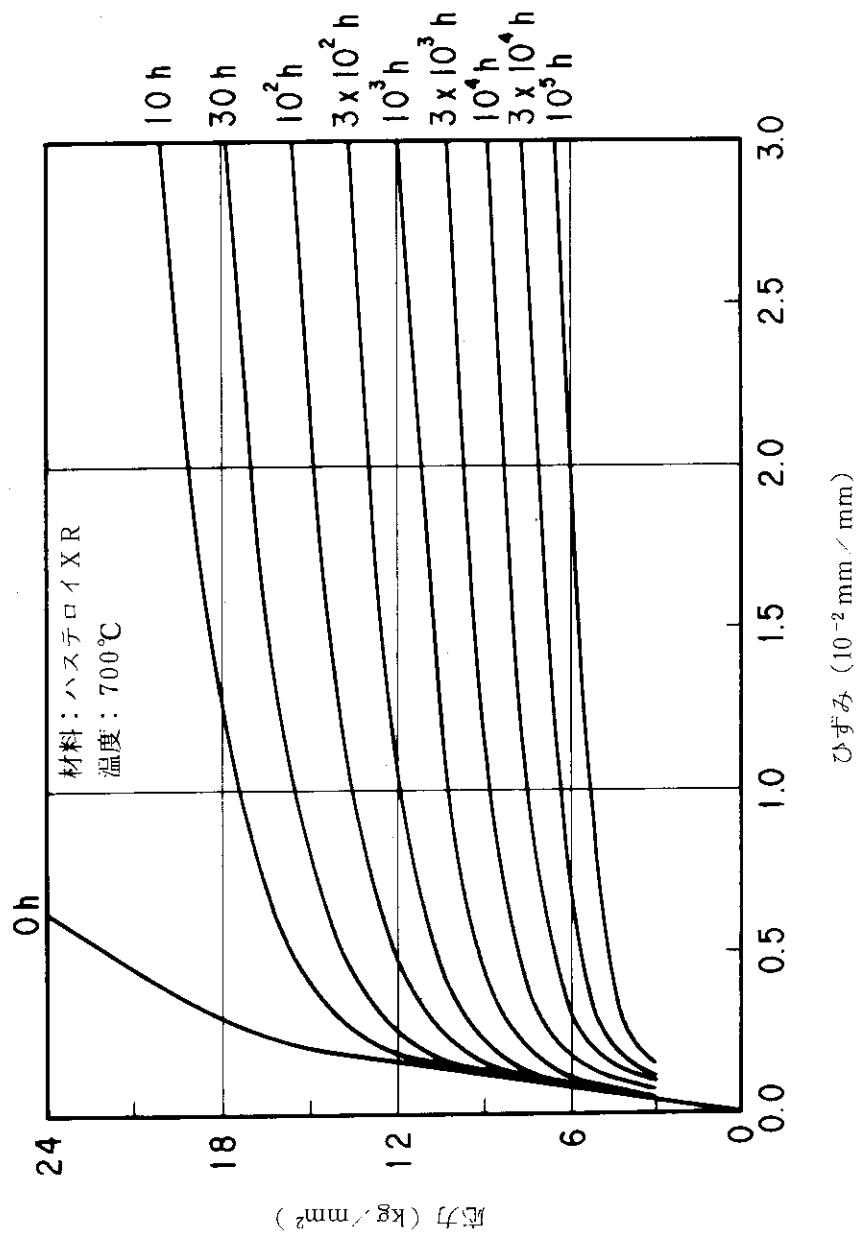
別図 1.11 (C)(4) ハスティロイ X R の等時応力 - ひずみ線図



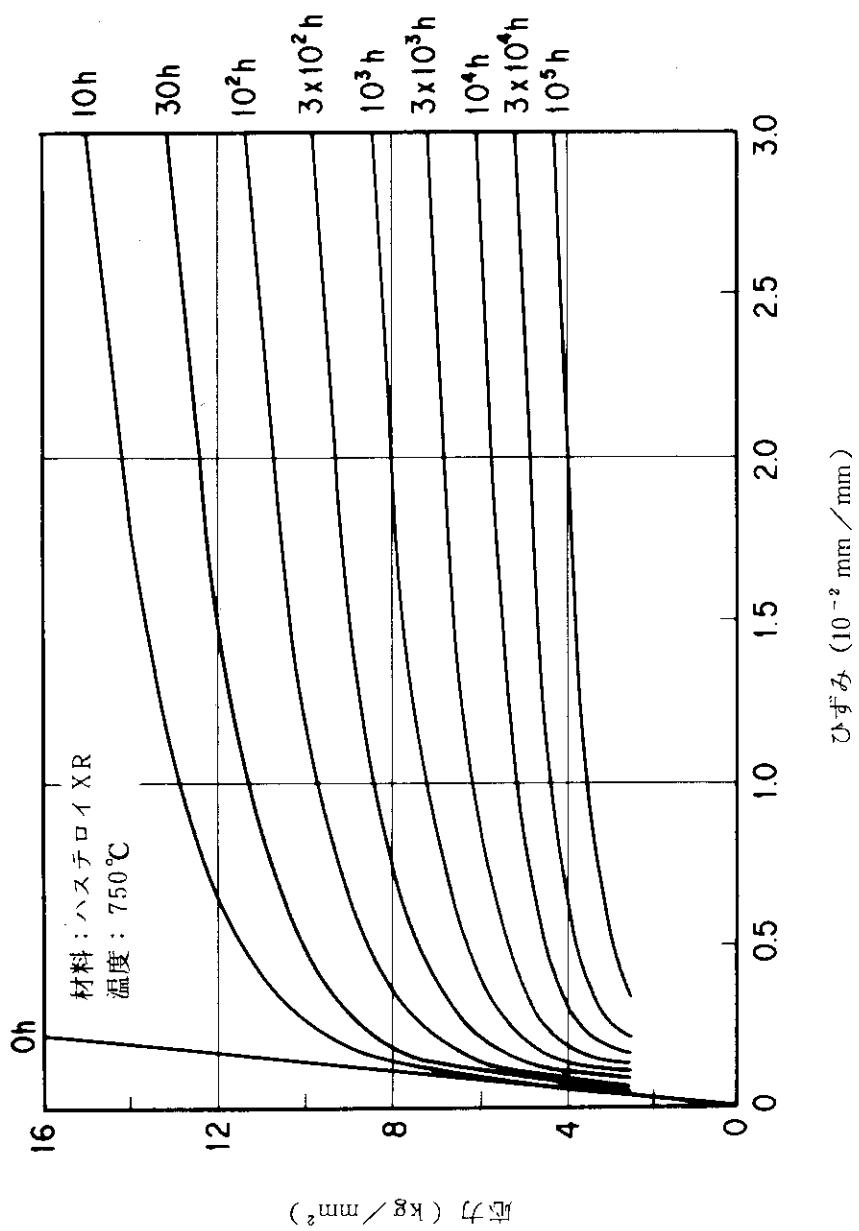
別図 1.11 (C)(5) ハスティロイX R の等時応力-ひずみ線図



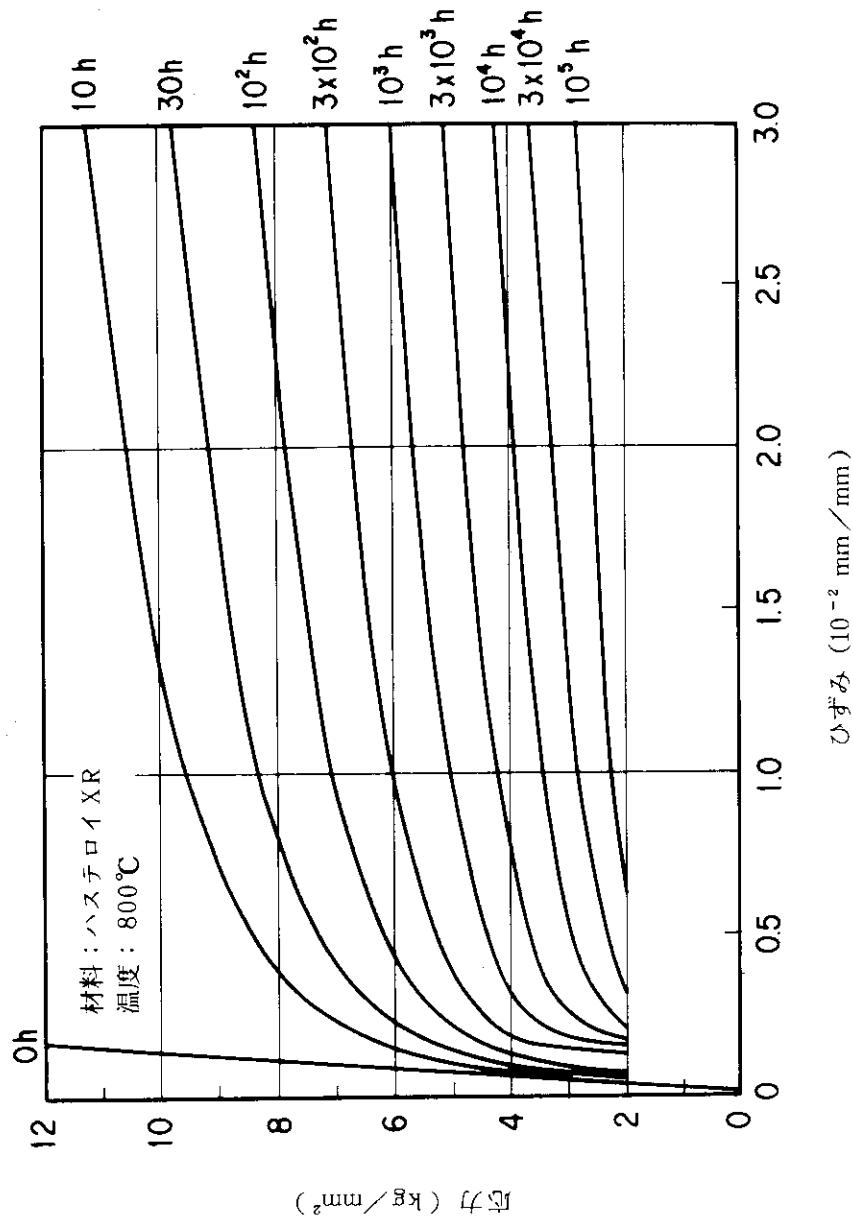
別図 1.11-(C)(6) ハスティロイ X R の等時応力-ひずみ線図



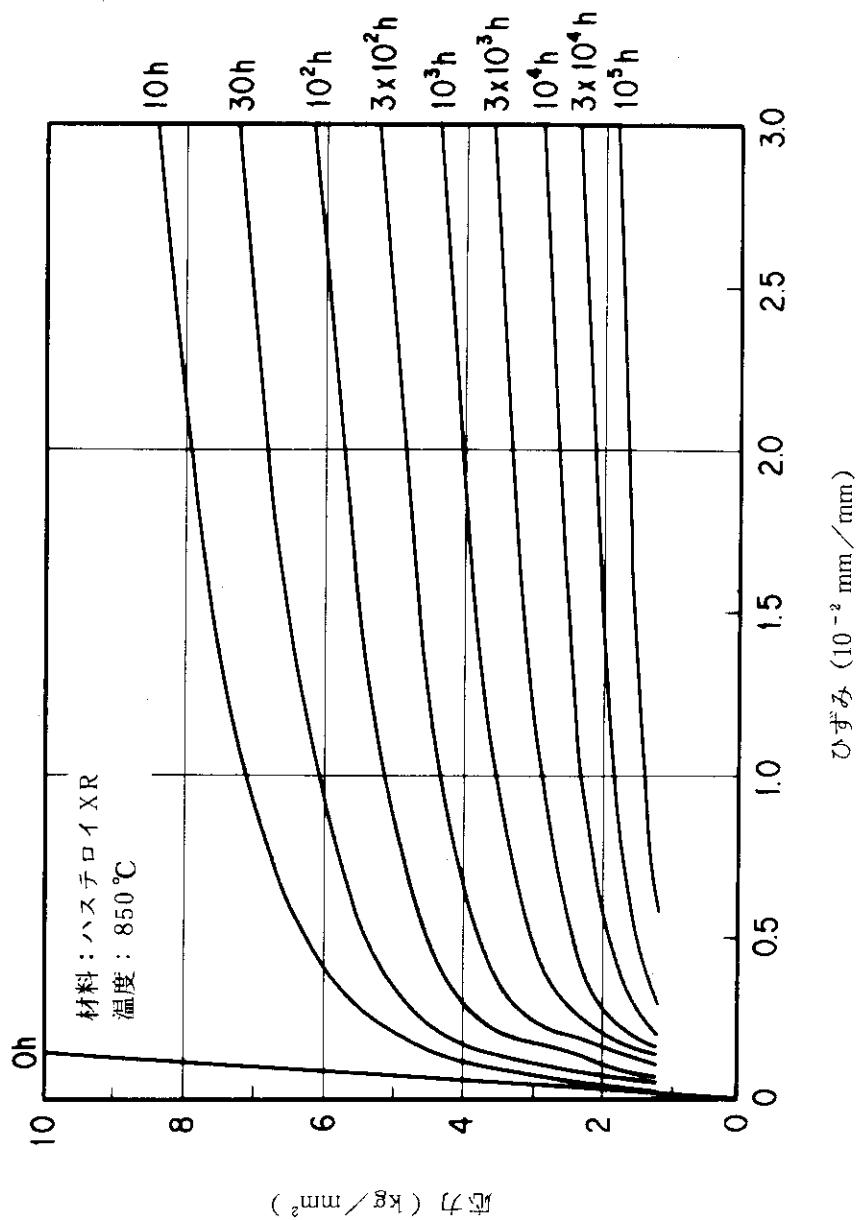
別図 1.11 (C)(7) ハスティロイ X R の等時応力 - ひずみ線図



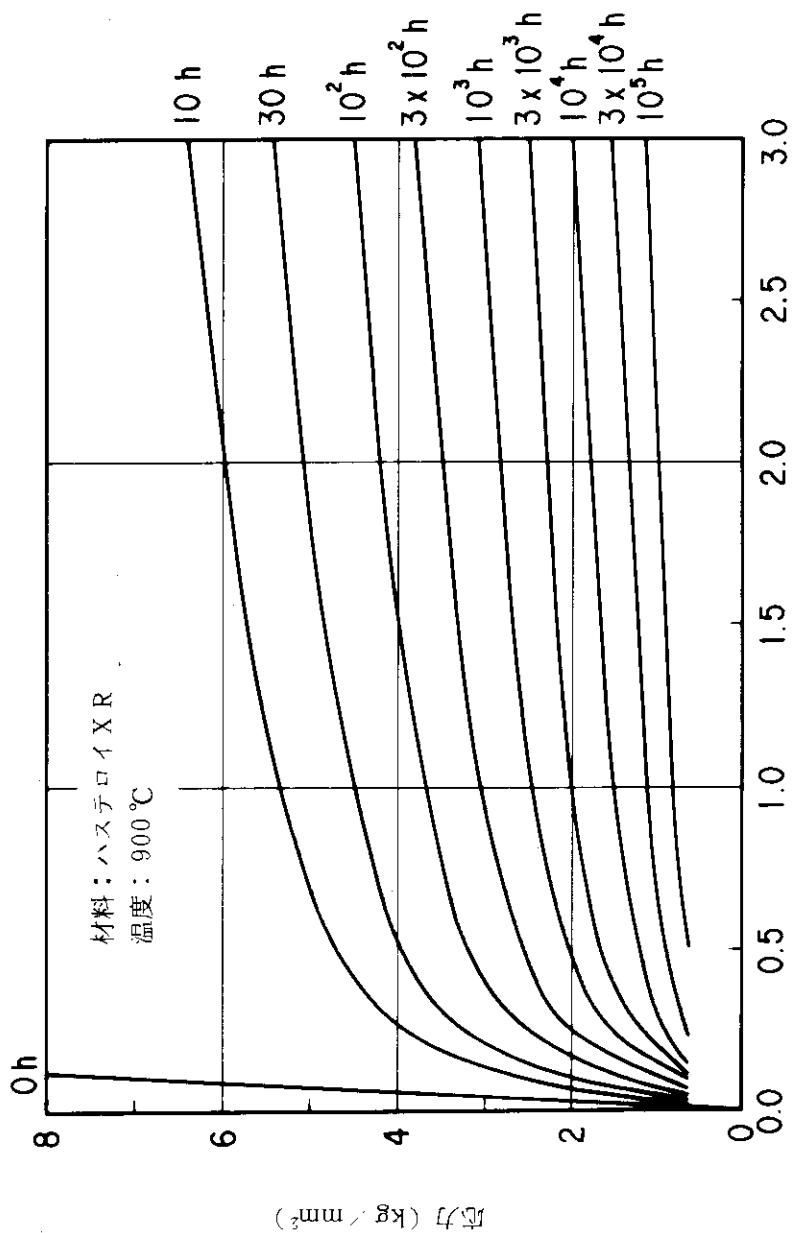
別図 1.11-(C)(8) ハスチロイ XR の等時応力 - ひずみ線図



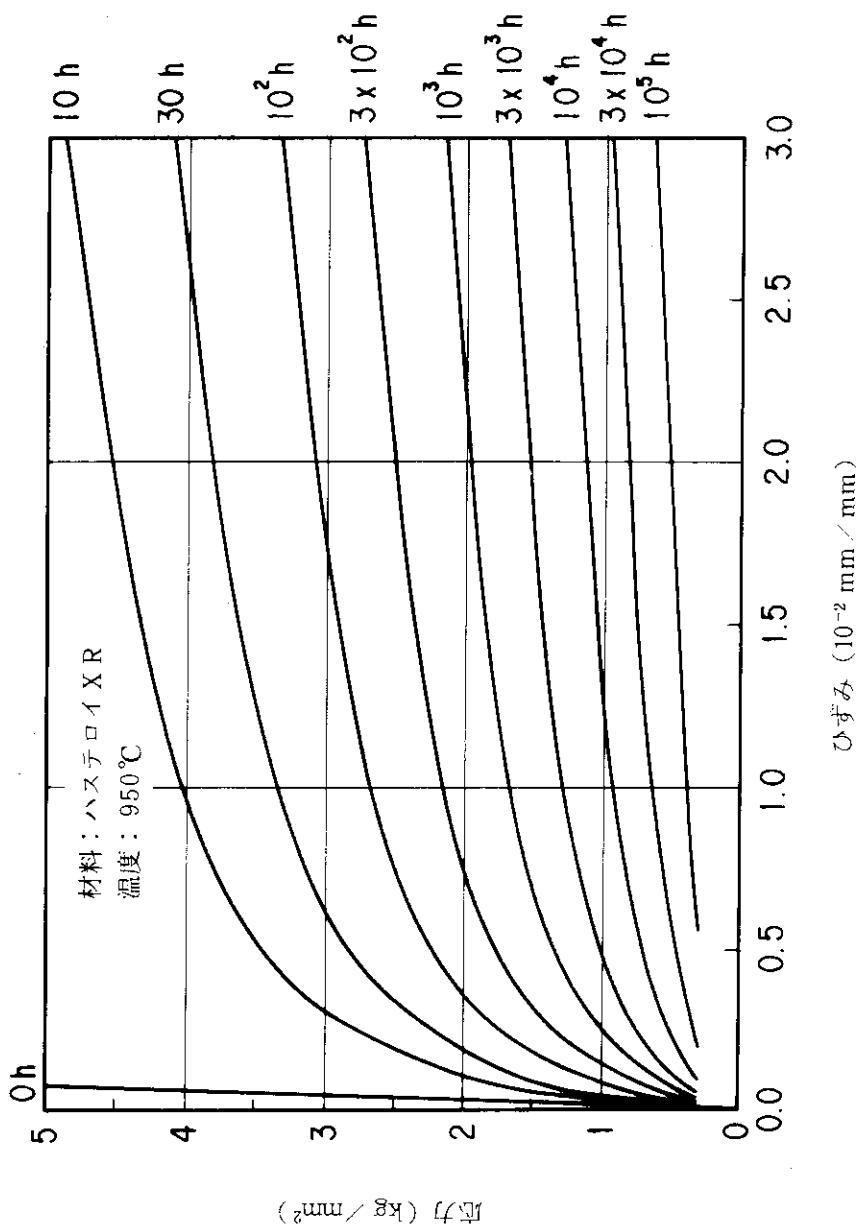
別図 1.11-(C)(9) ハスティロイ XR の等時応力一ひずみ線図



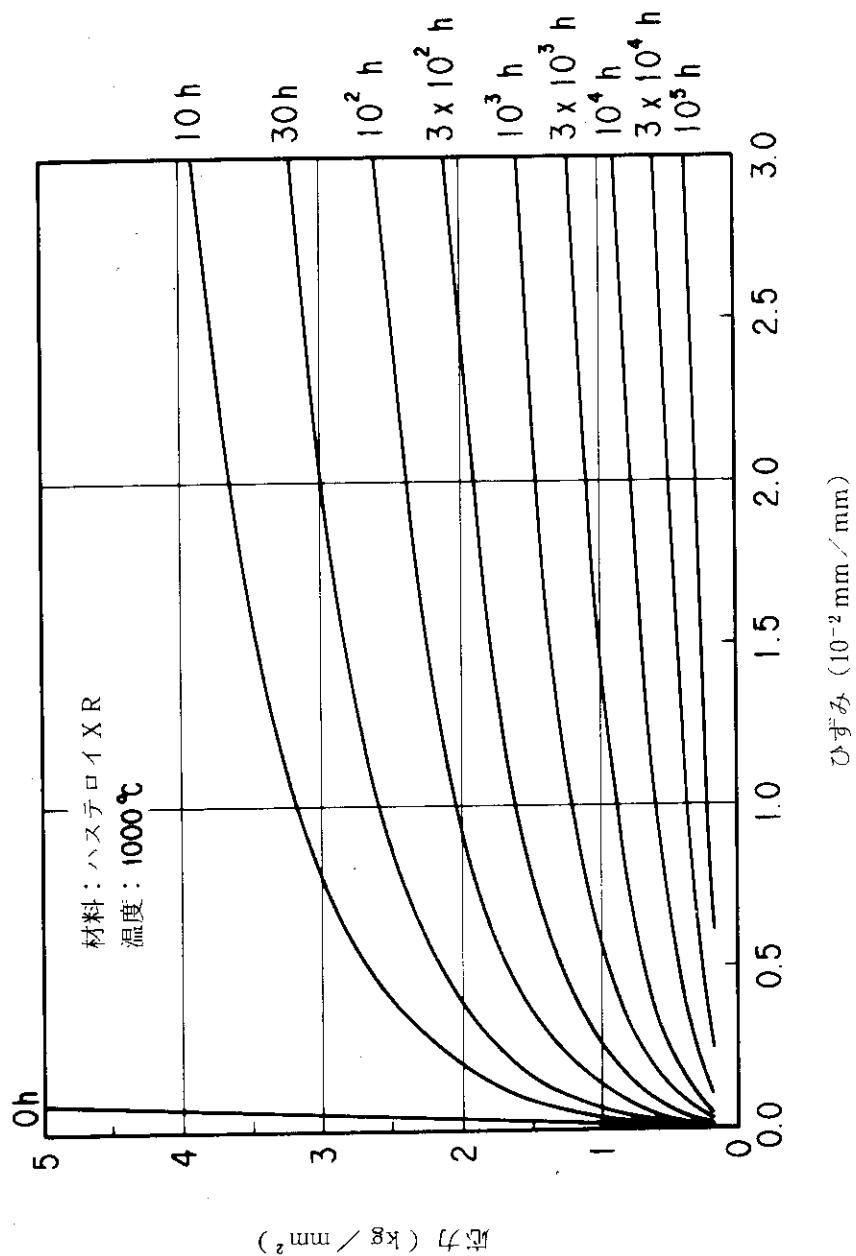
別図 1.11-(C) (1) ハスチロイ XR の等時応力 - ひずみ線図



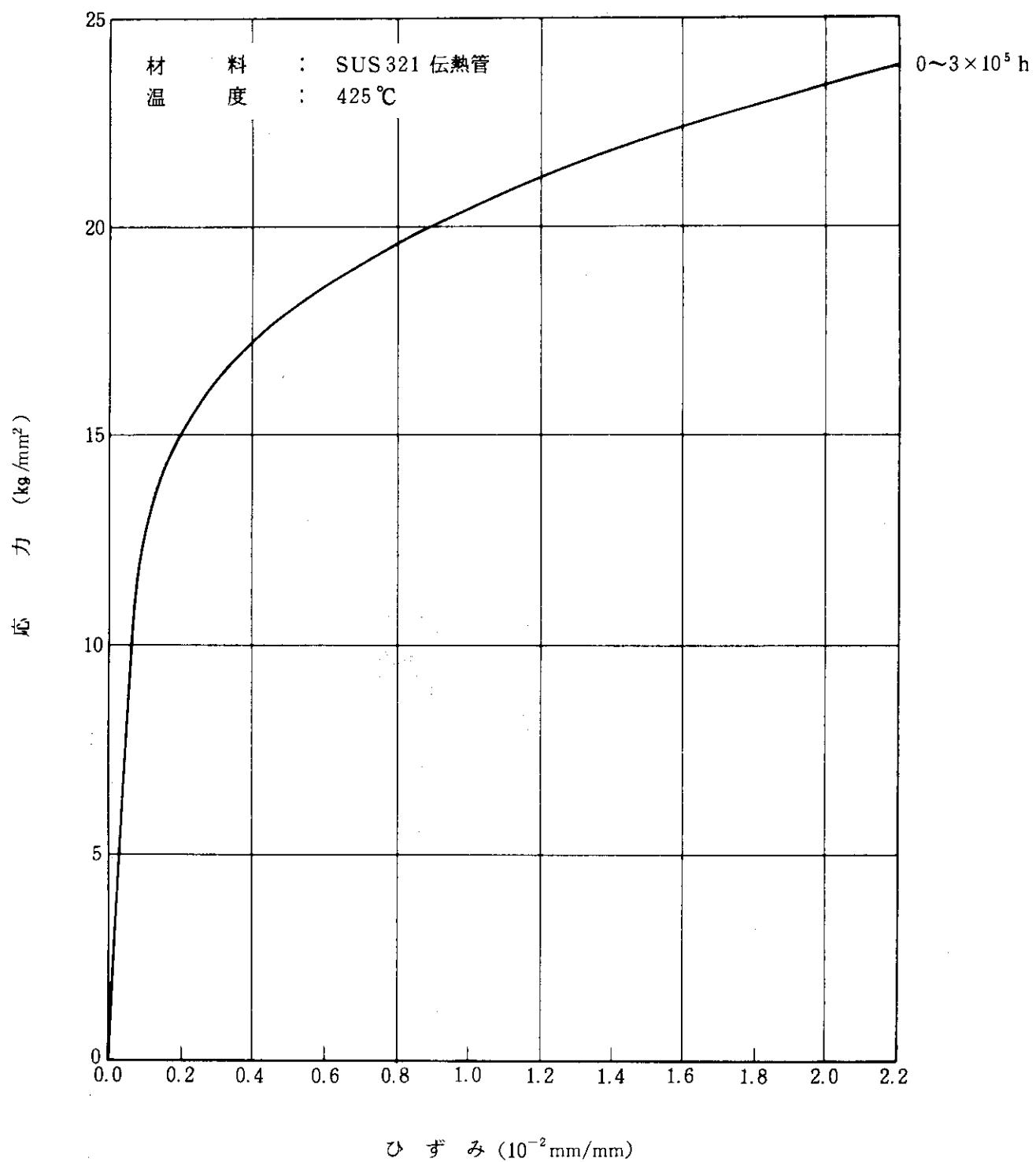
別図 1.11-(Cii) ハスティロイ X R の等時応力 - ひずみ線図



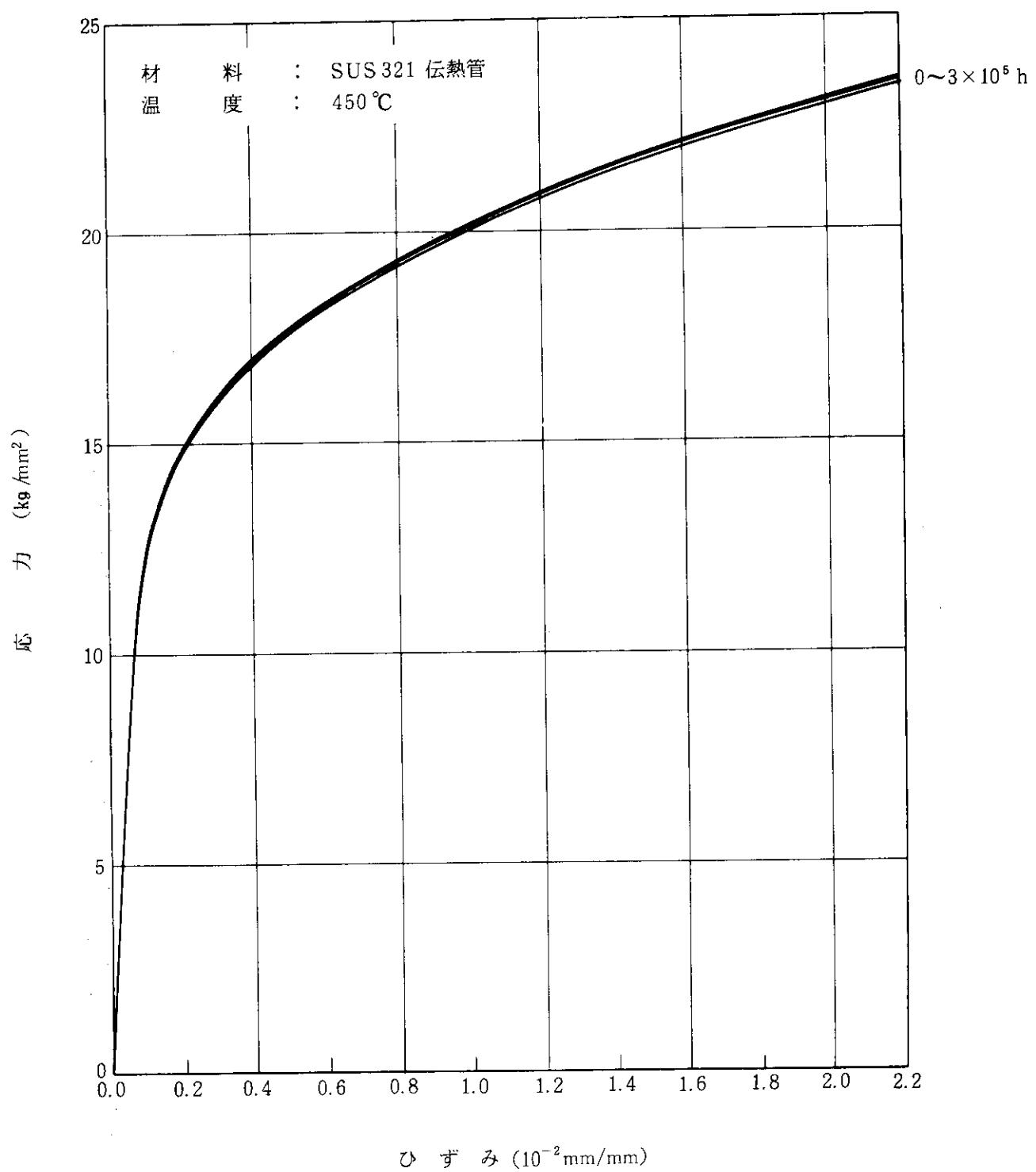
別図 1.11 ハスティロイ XR の等時応力 - ひずみ線図



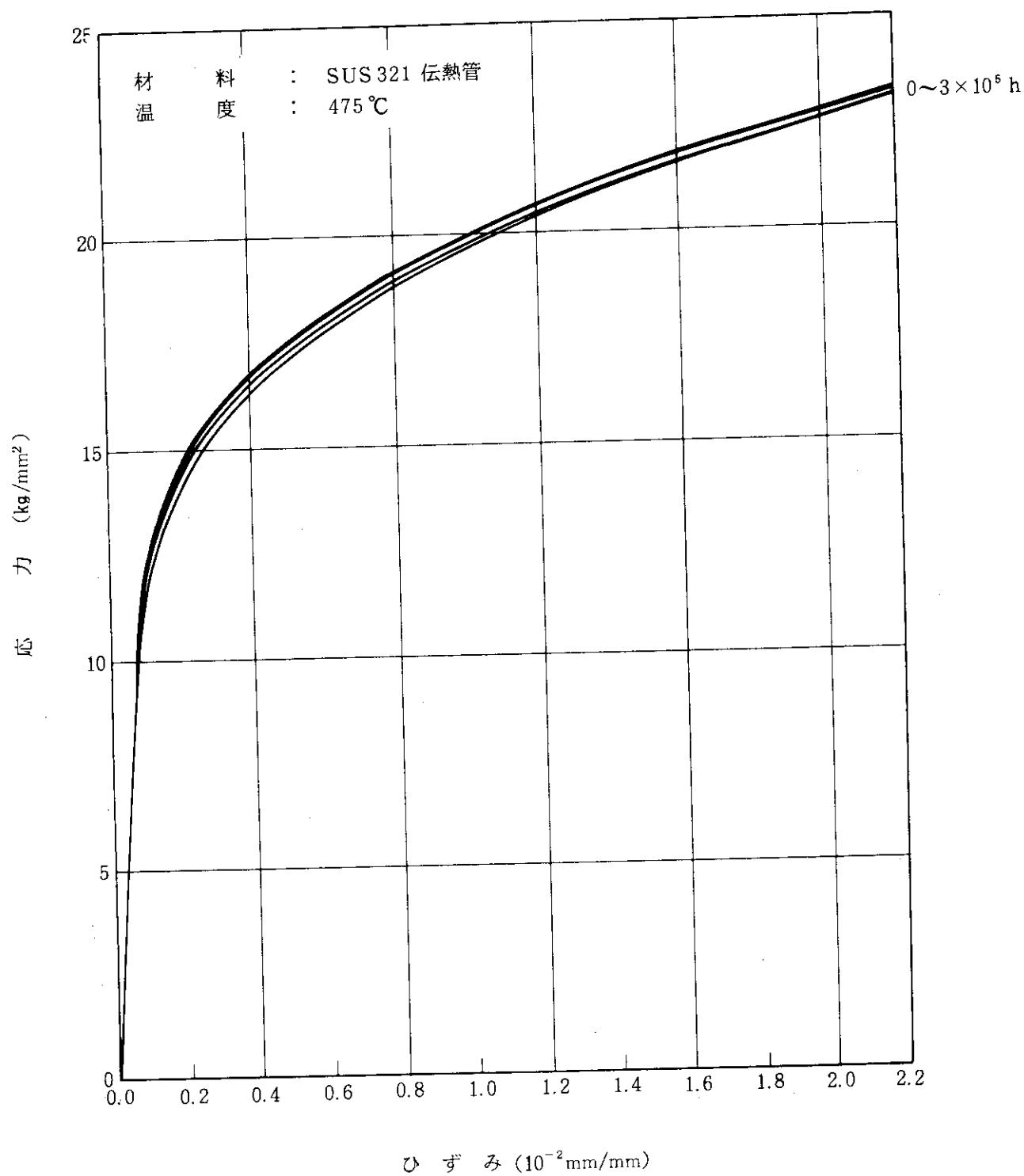
別図 1.11-(C)(3) ハスティロイ XR の等時応力 - ひずみ線図



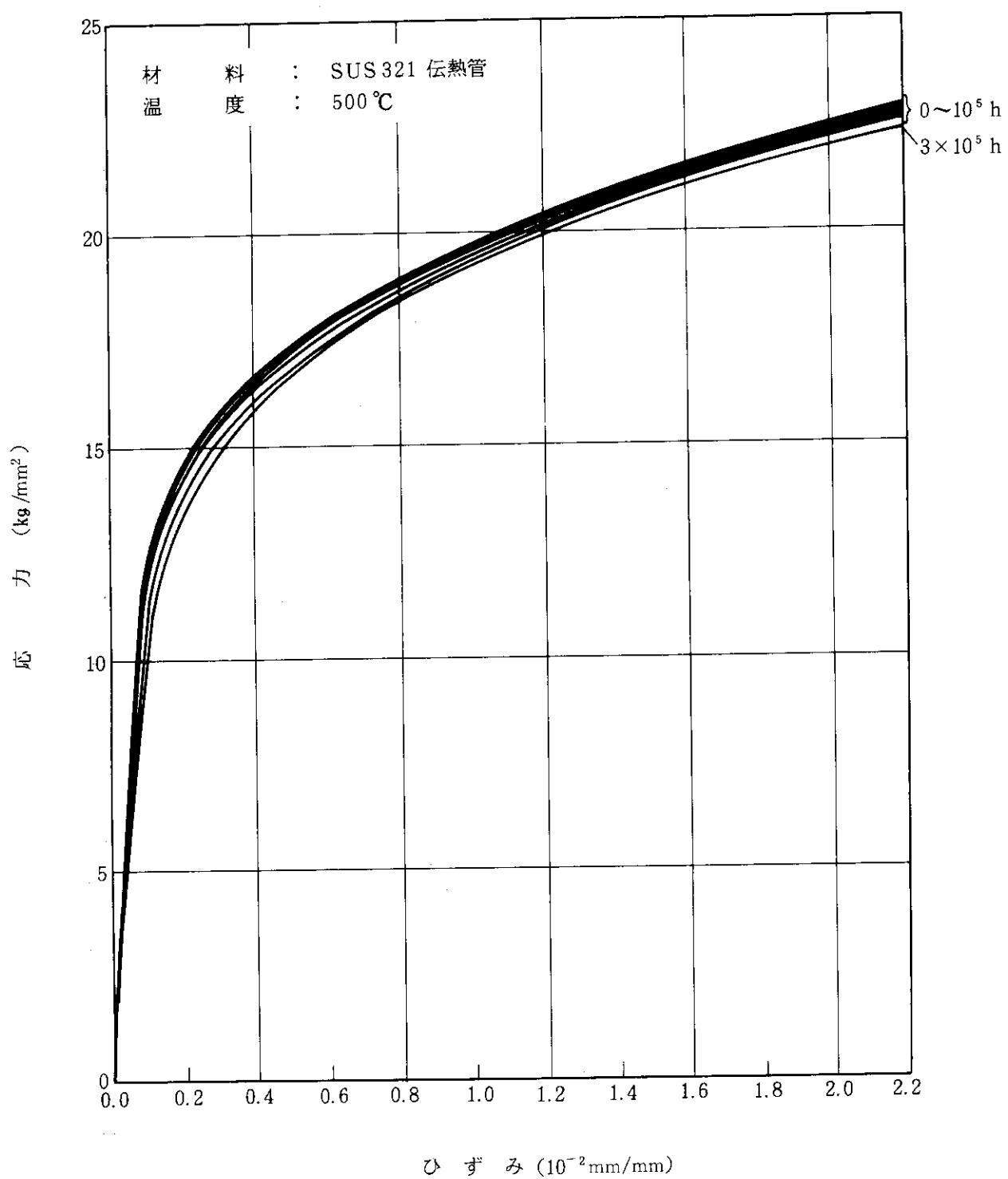
別図 1.11-(d)(1) SUS 321 伝熱管の等時応力-ひずみ線図



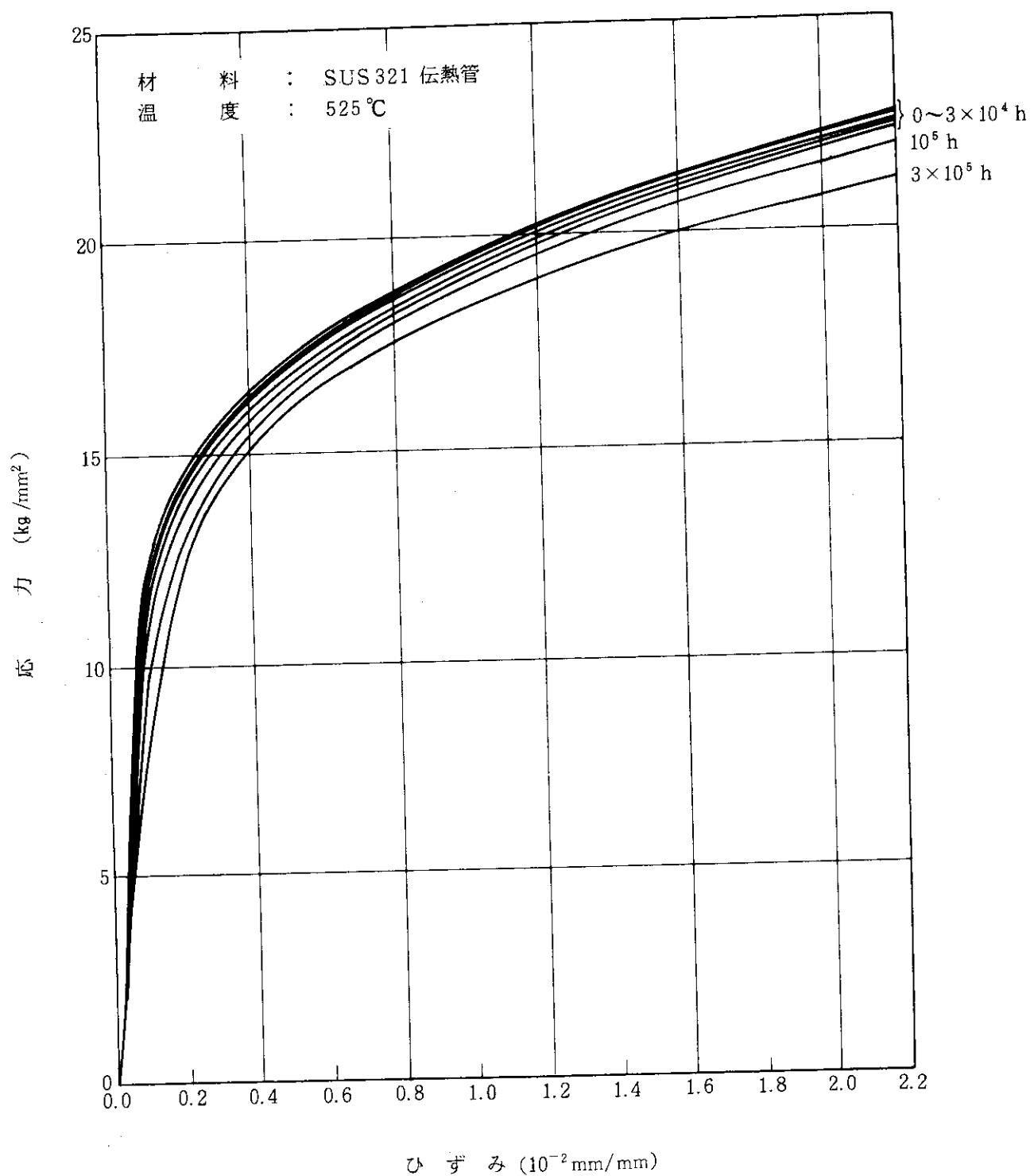
別図 1.11-(a)(2) SUS 321 伝熱管の等時応力-ひずみ線図



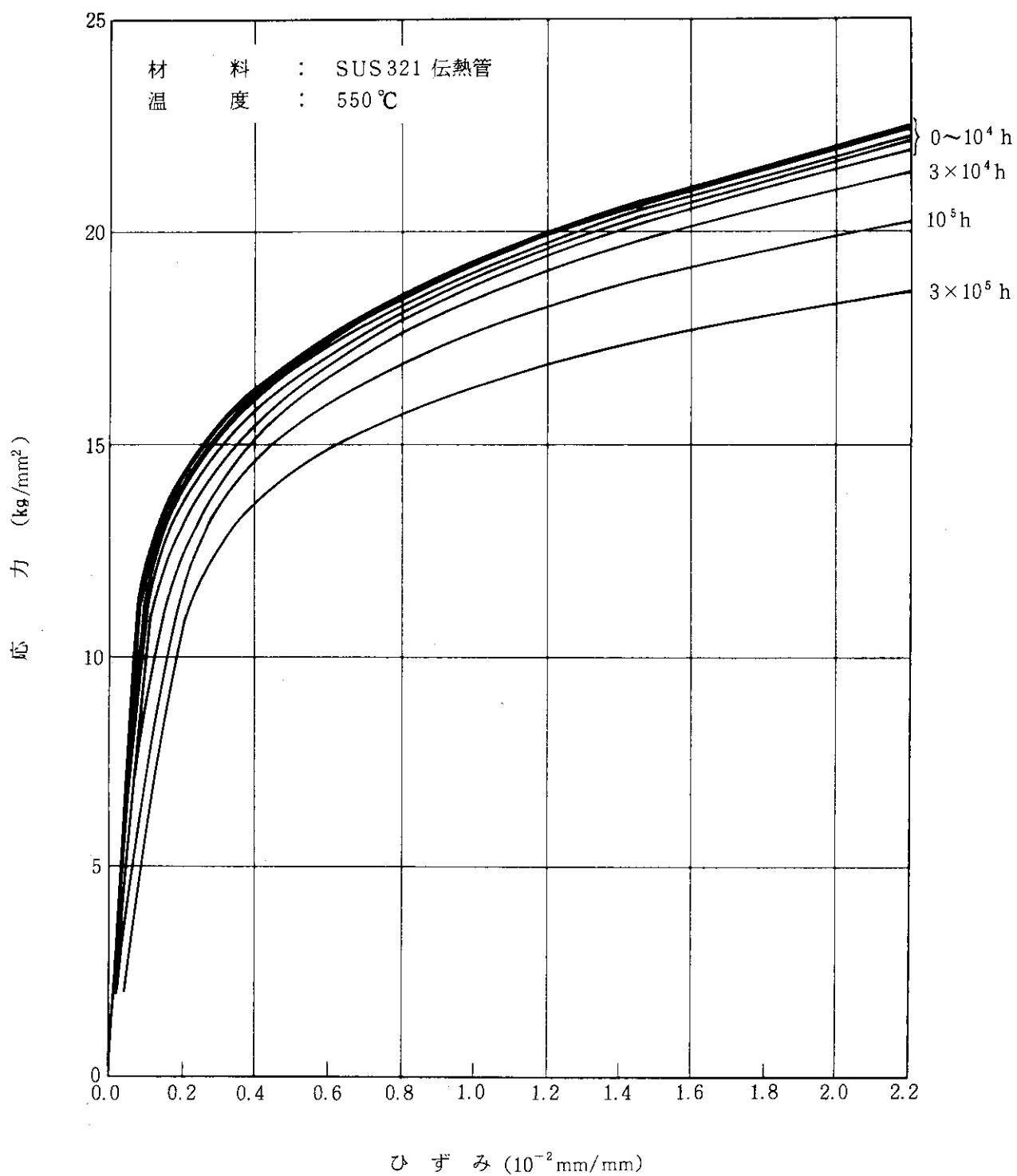
別図 1.11-(d)(3) SUS 321 伝熱管の等時応力-ひずみ線図



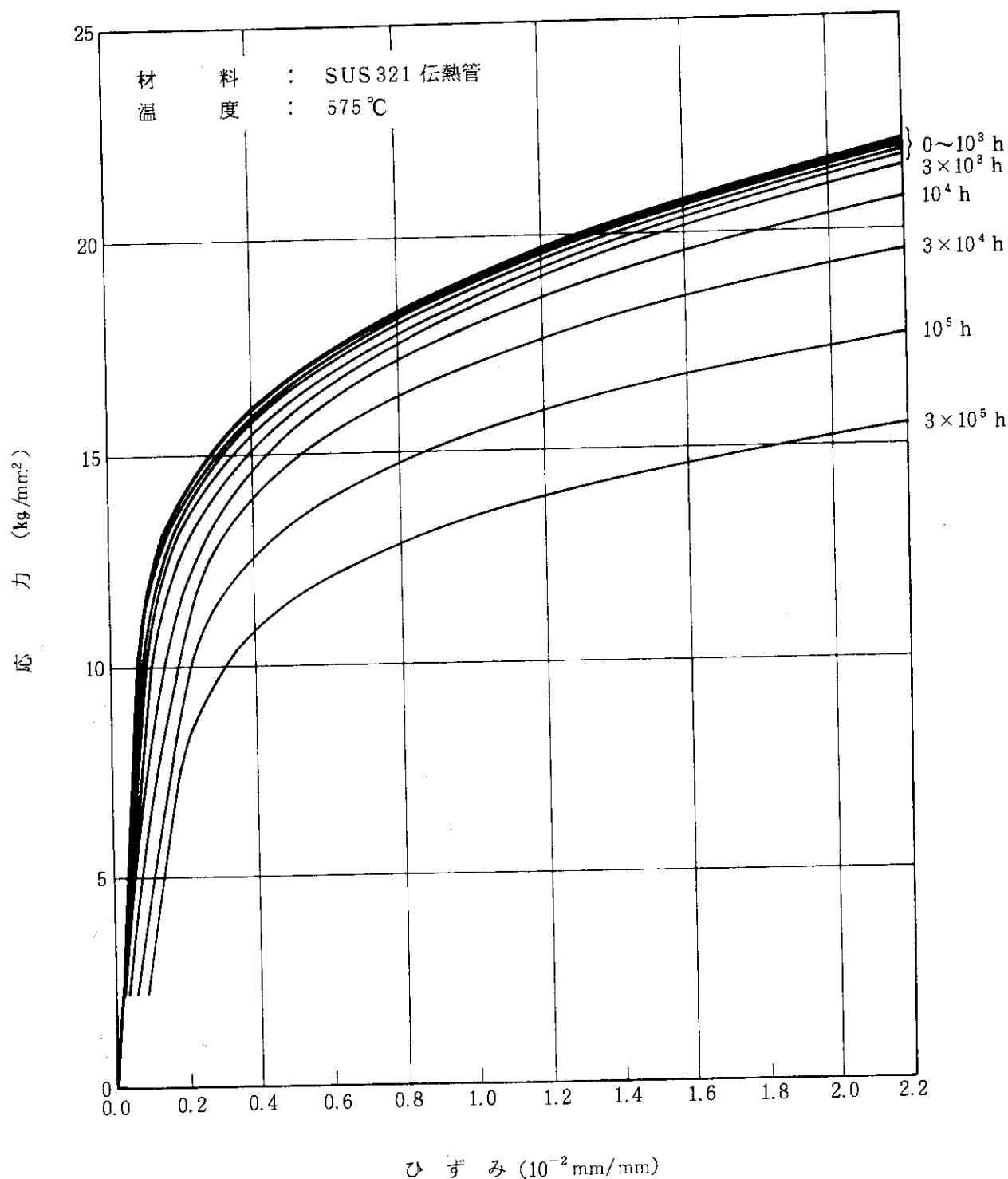
別図 1.11-(d)(4) SUS 321 伝熱管の等時応力-ひずみ線図



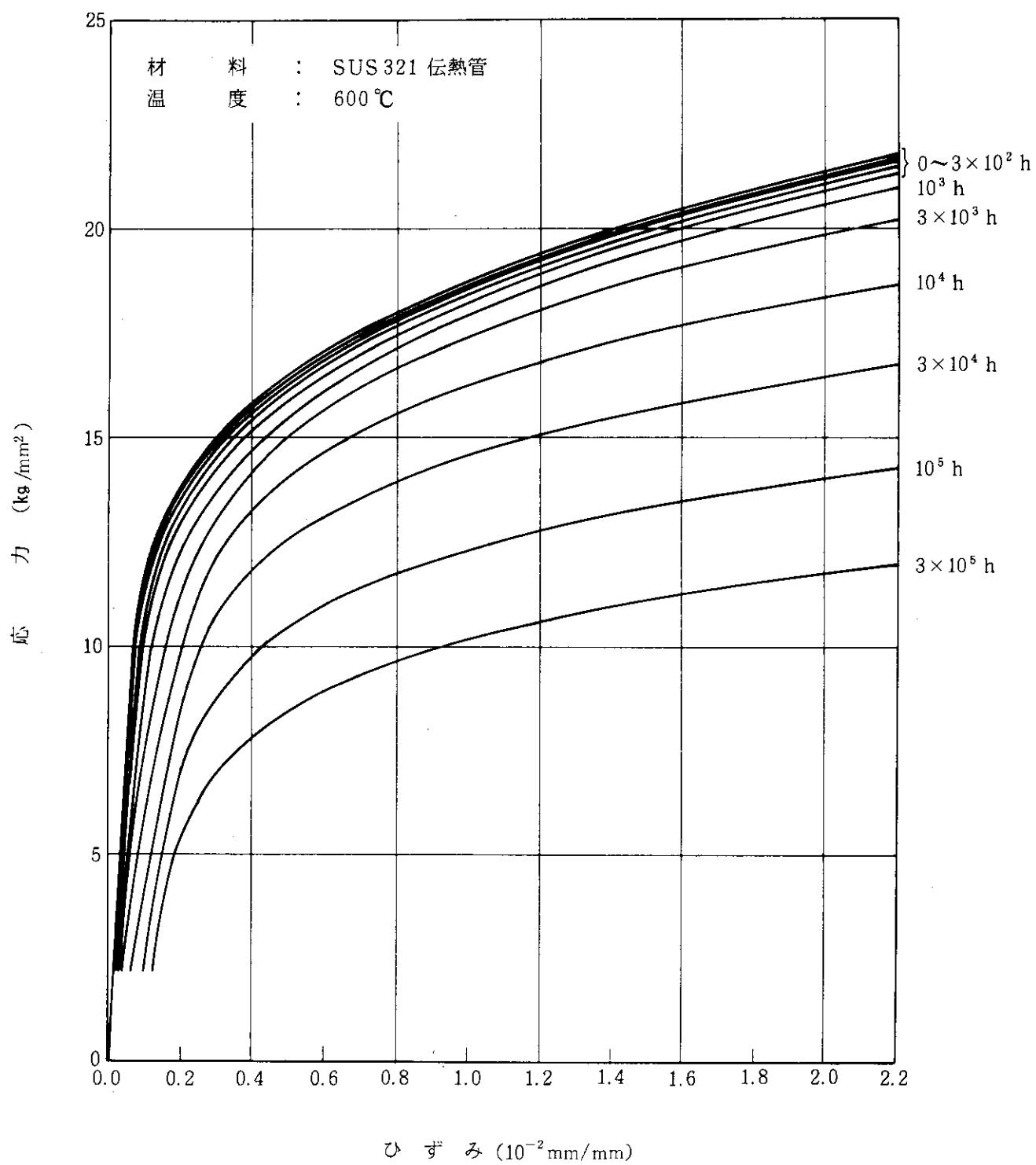
別図 1.11-(d)(5) SUS 321 伝熱管の等時応力-ひずみ線図



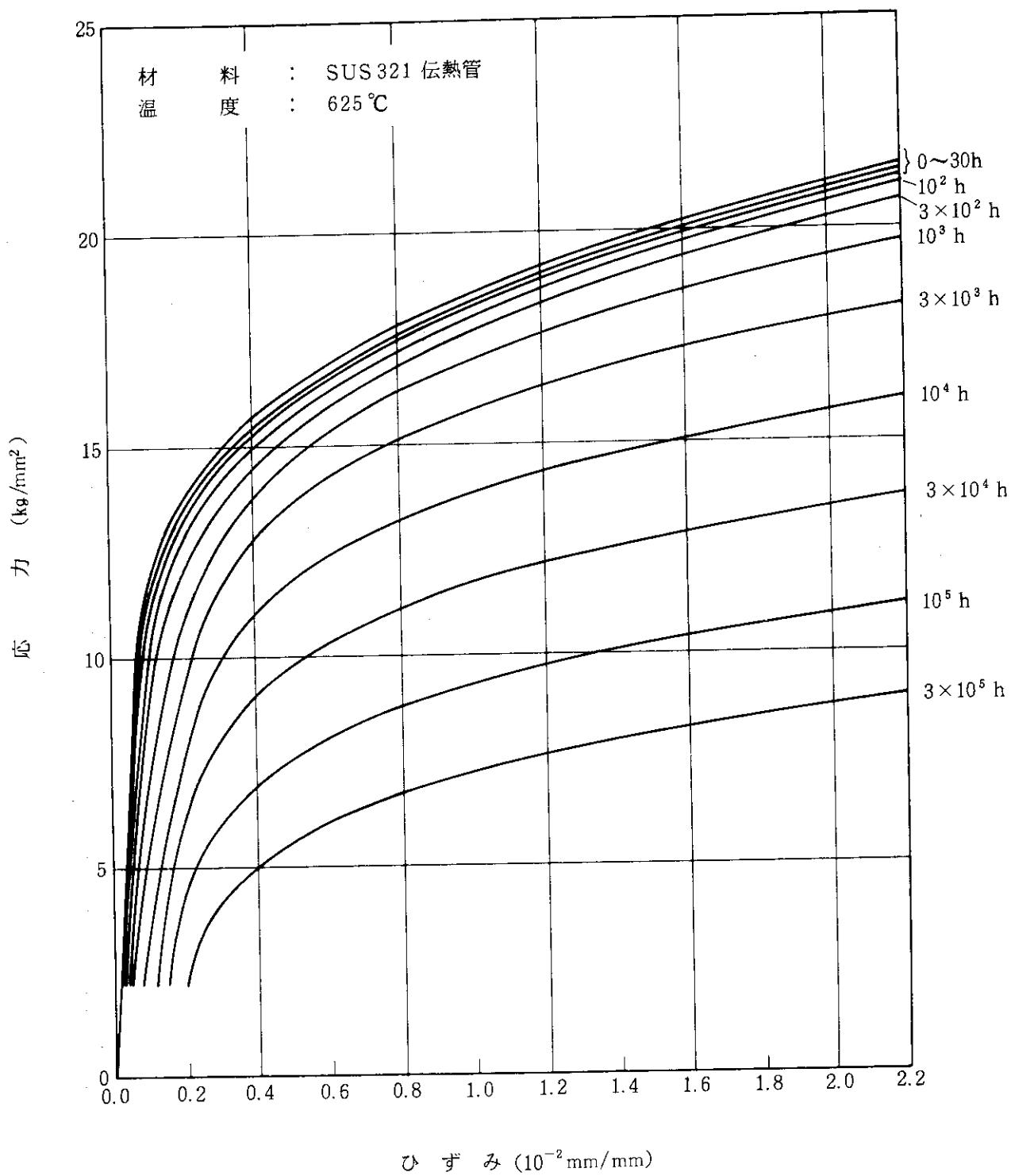
別図 1.11-(a)(6) SUS 321 伝熱管の等時応力-ひずみ線図



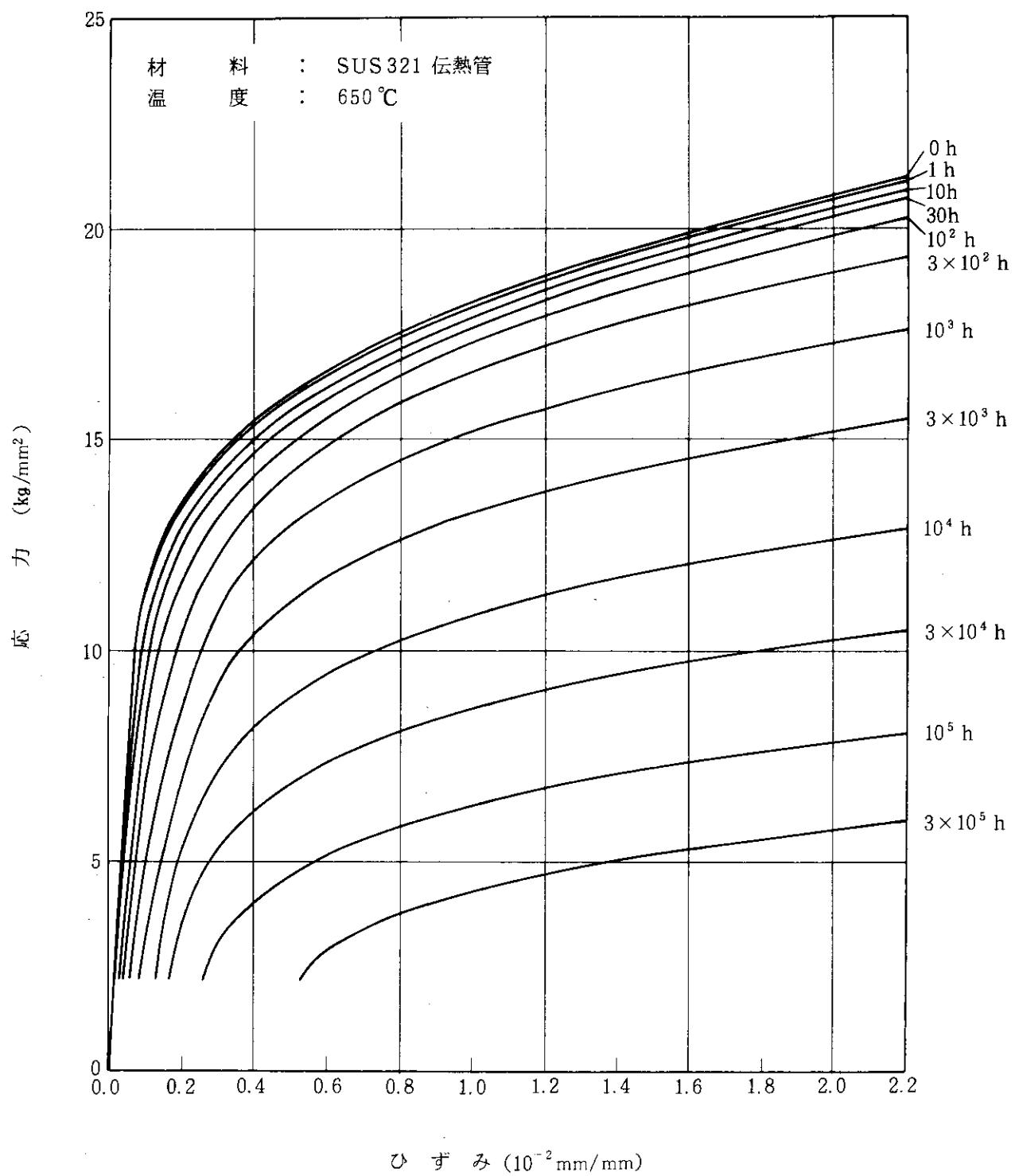
別図 1.11-(d)(7) SUS 321 伝熱管の等時応力-ひずみ線図



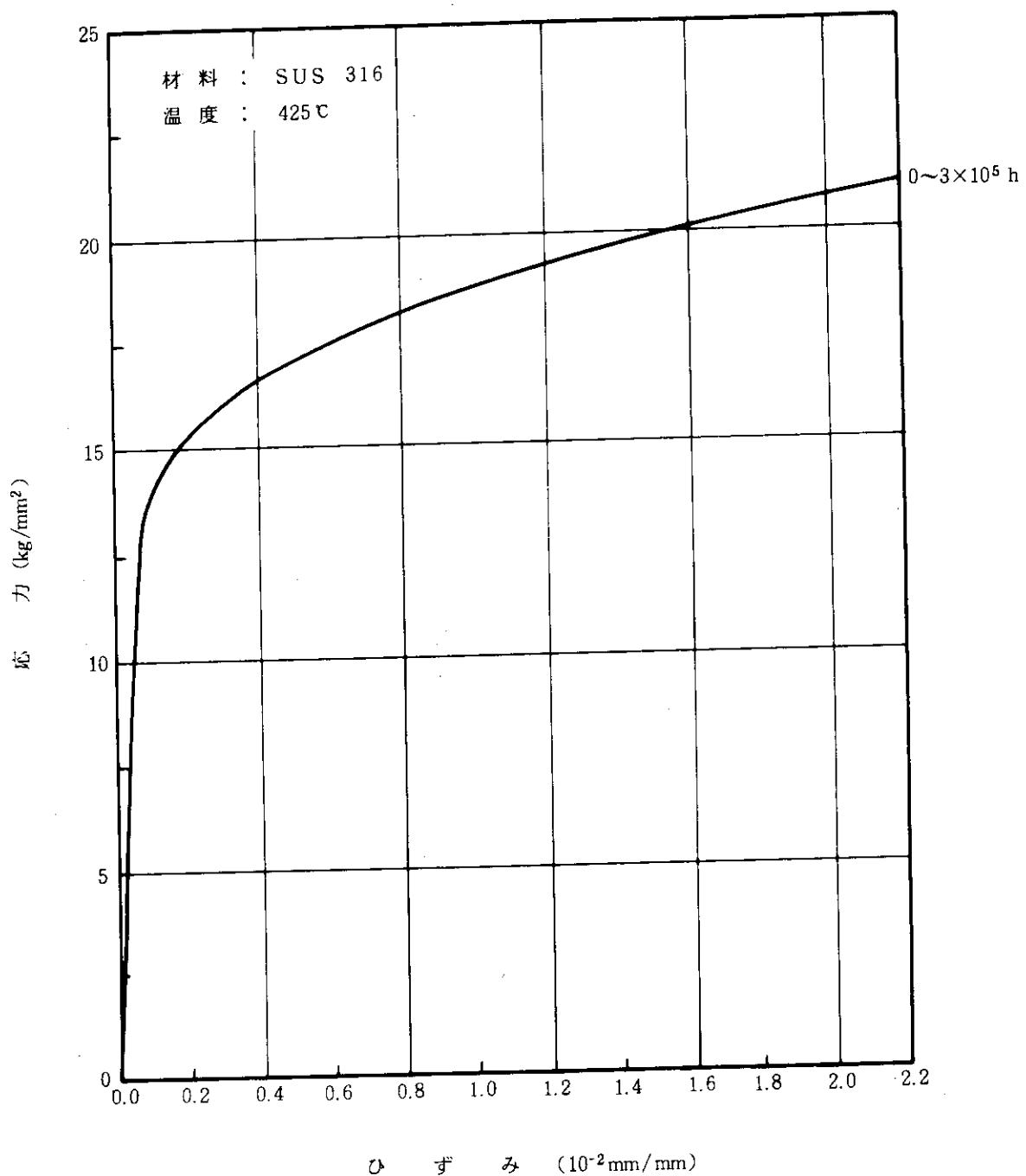
別図 1.11-(d)(8) SUS 321 伝熱管の等時応力-ひずみ線図



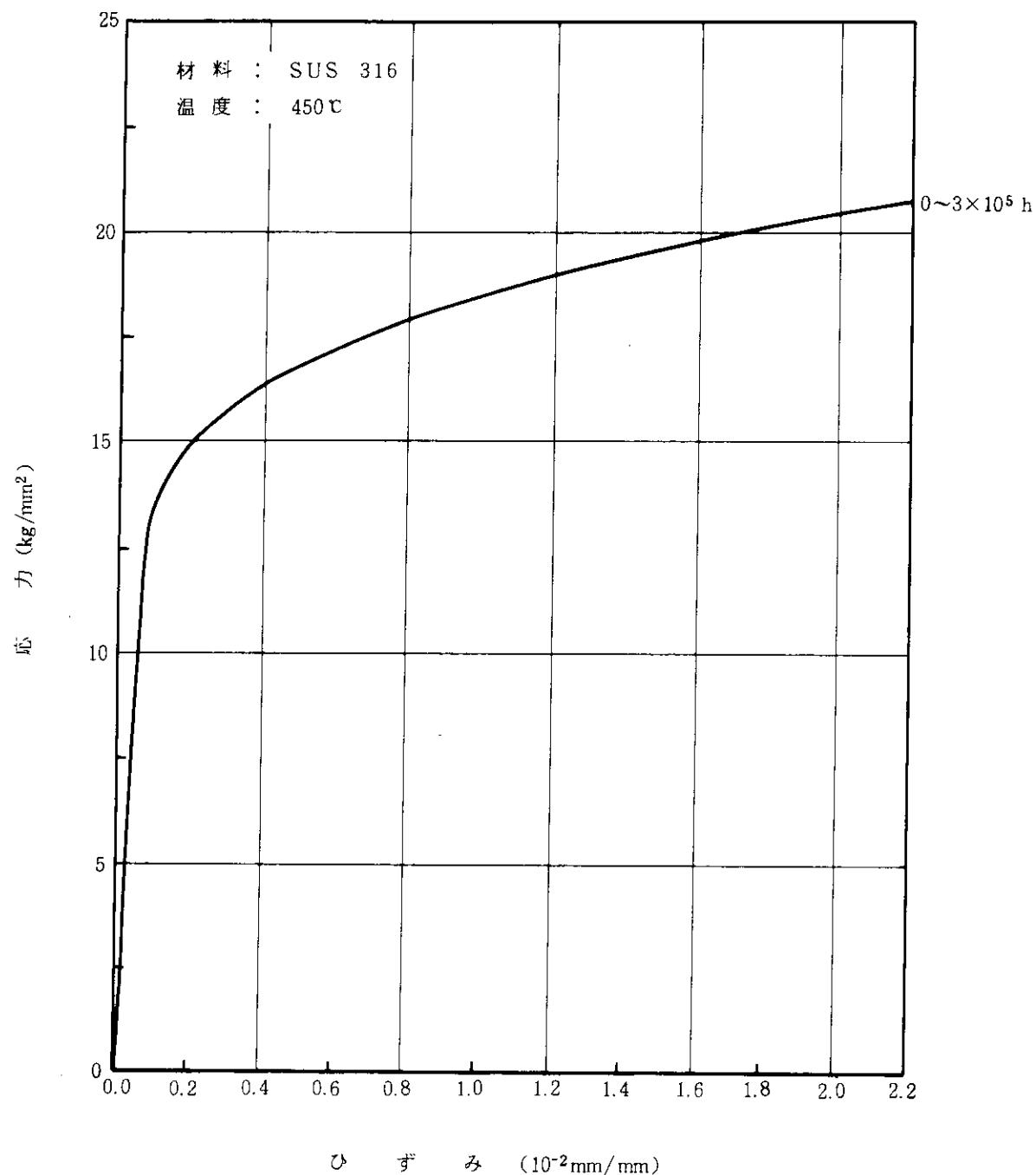
別図 1.11-(d)(9) SUS 321 伝熱管の等時応力-ひずみ線図



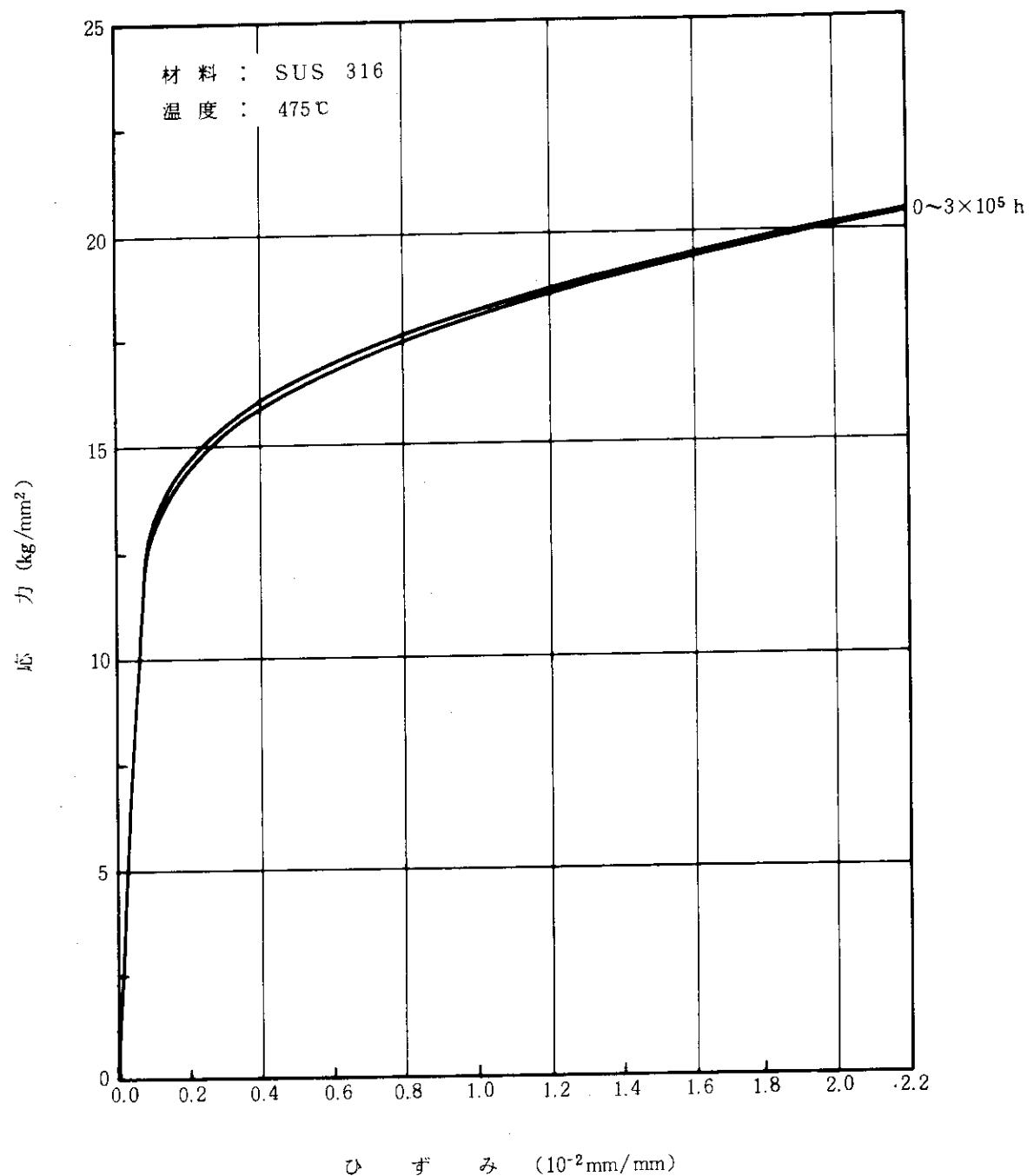
別図 1.11-(d)⑩ SUS 321 伝熱管の等時応力-ひずみ線図



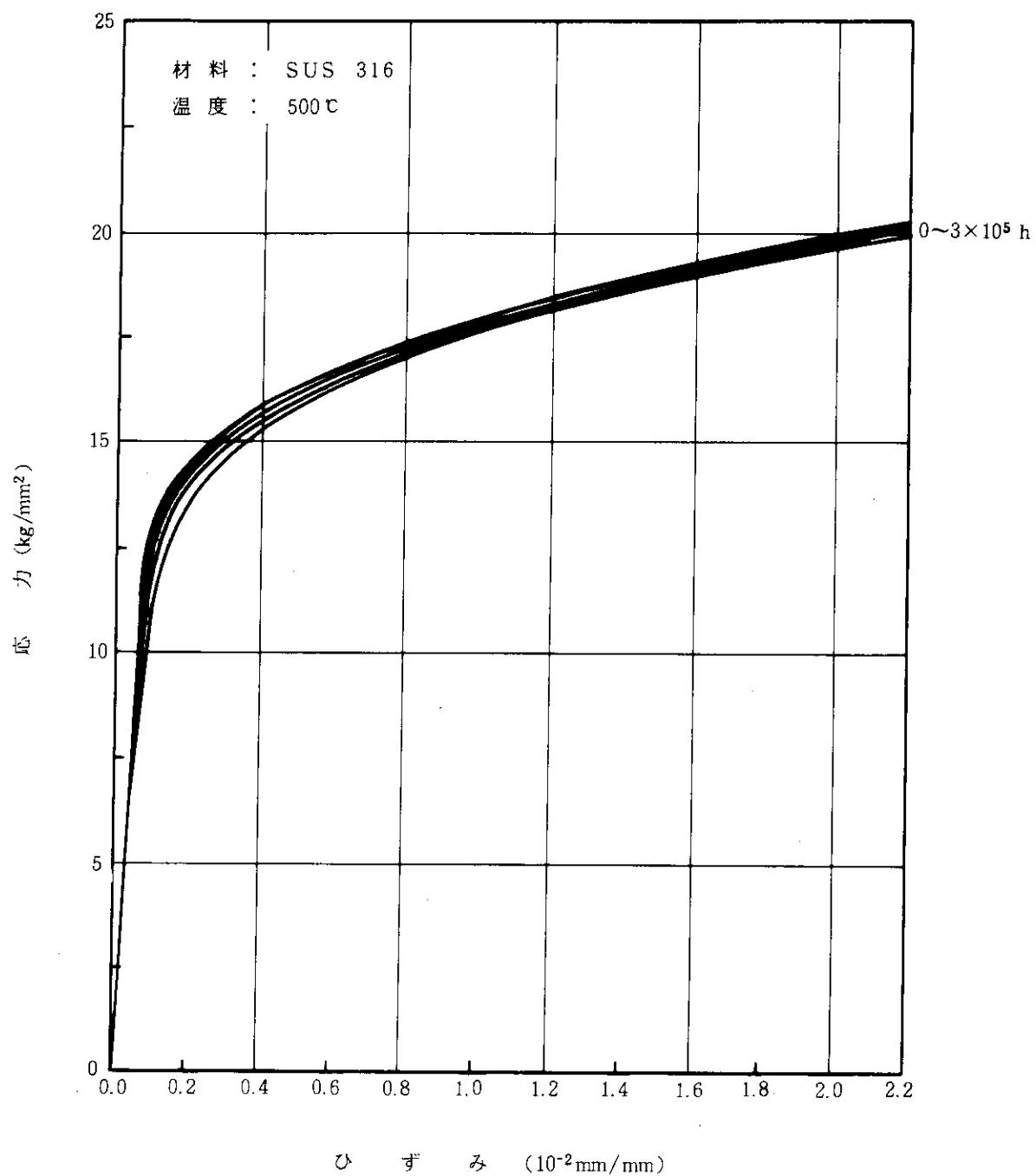
別図1.11-(e)(1) SUS 316の等時応力-ひずみ線図



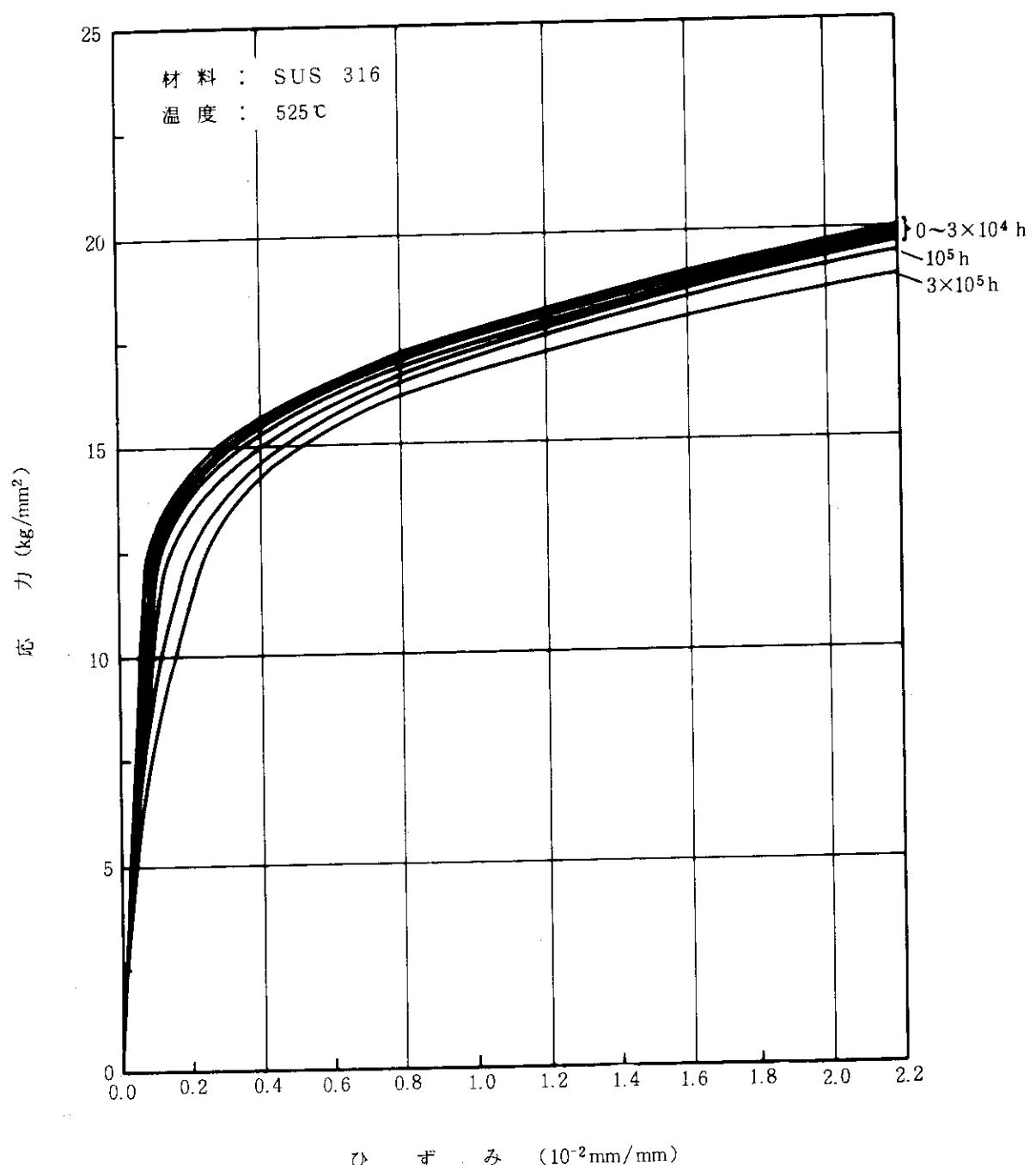
別図1.11-(e)(2) SUS 316の等時応力-ひずみ線図



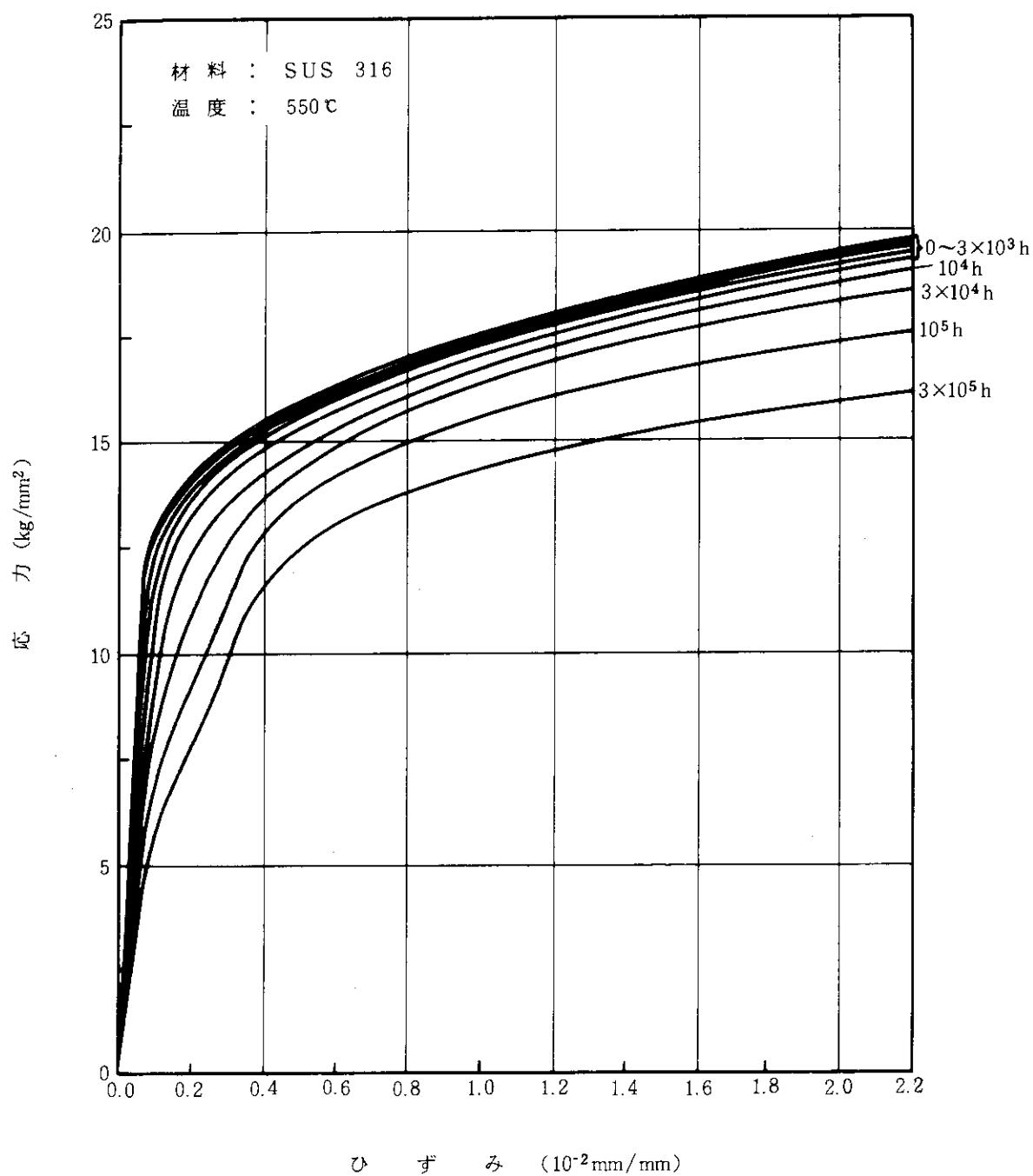
別図1.11-(e)(3) SUS 316の等時応力-ひずみ線図



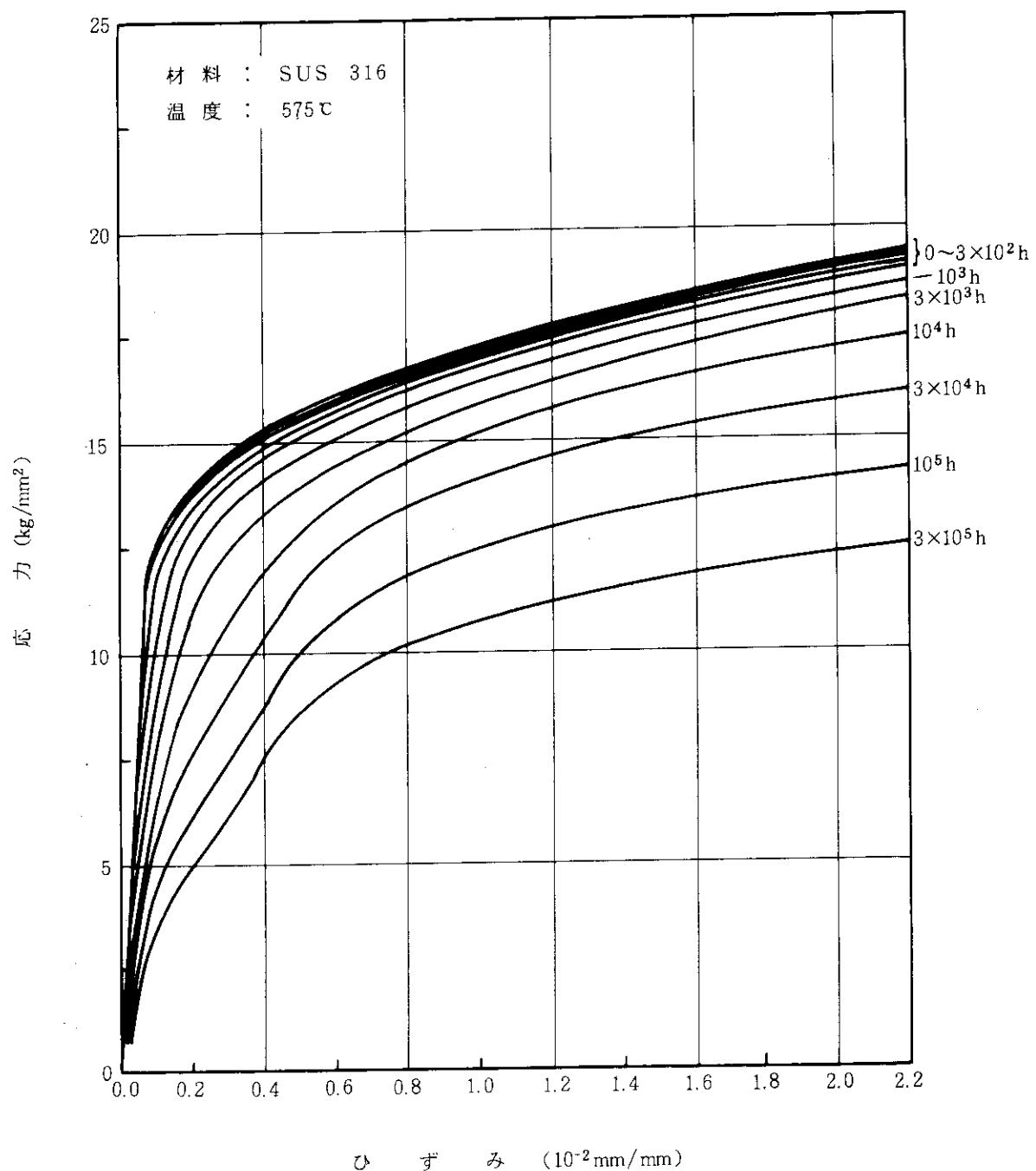
別図1.11-(e)(4) SUS 316の等時応力-ひずみ線図



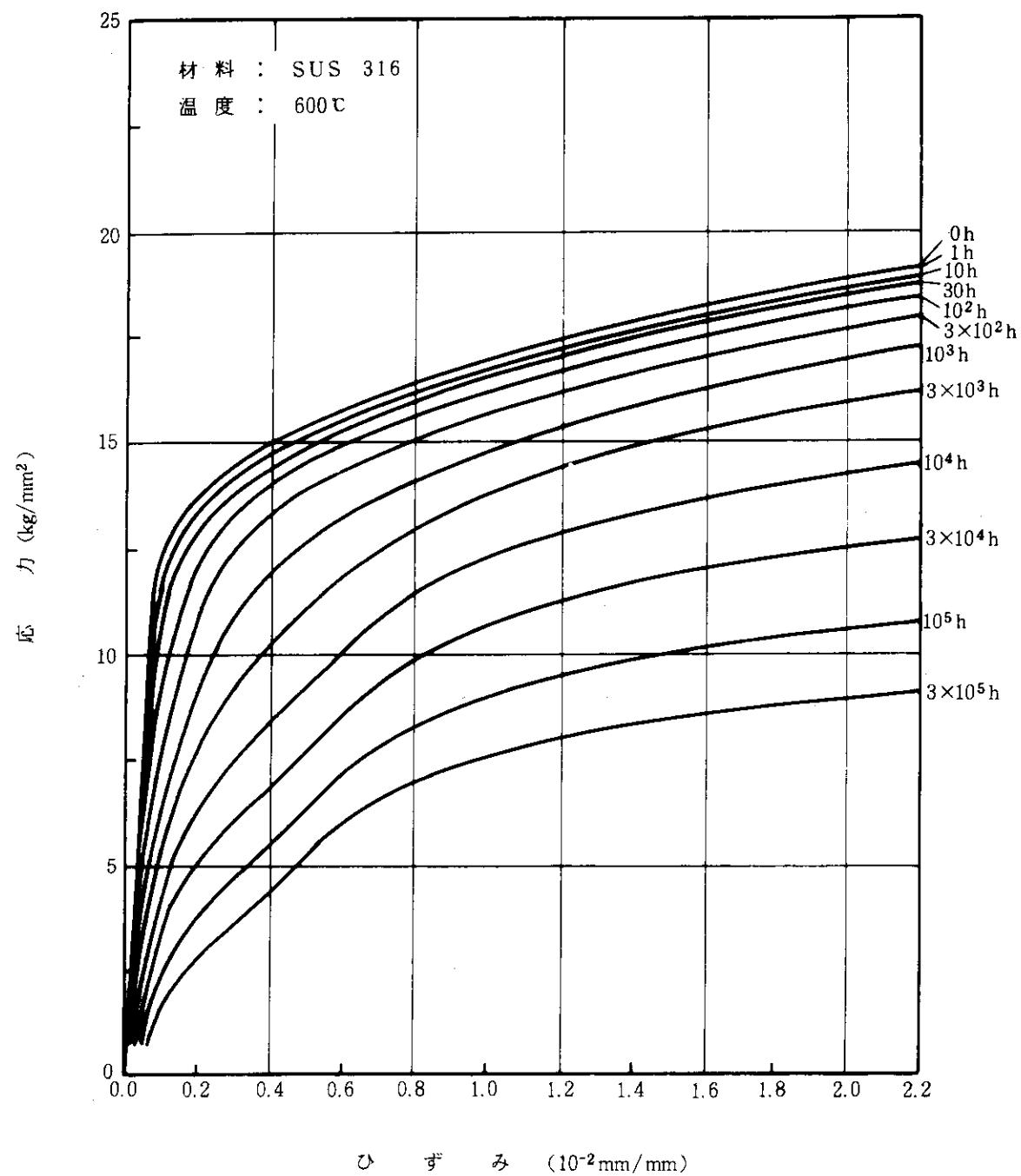
別図1.11-(e)(5) SUS 316の等時応力-ひずみ線図



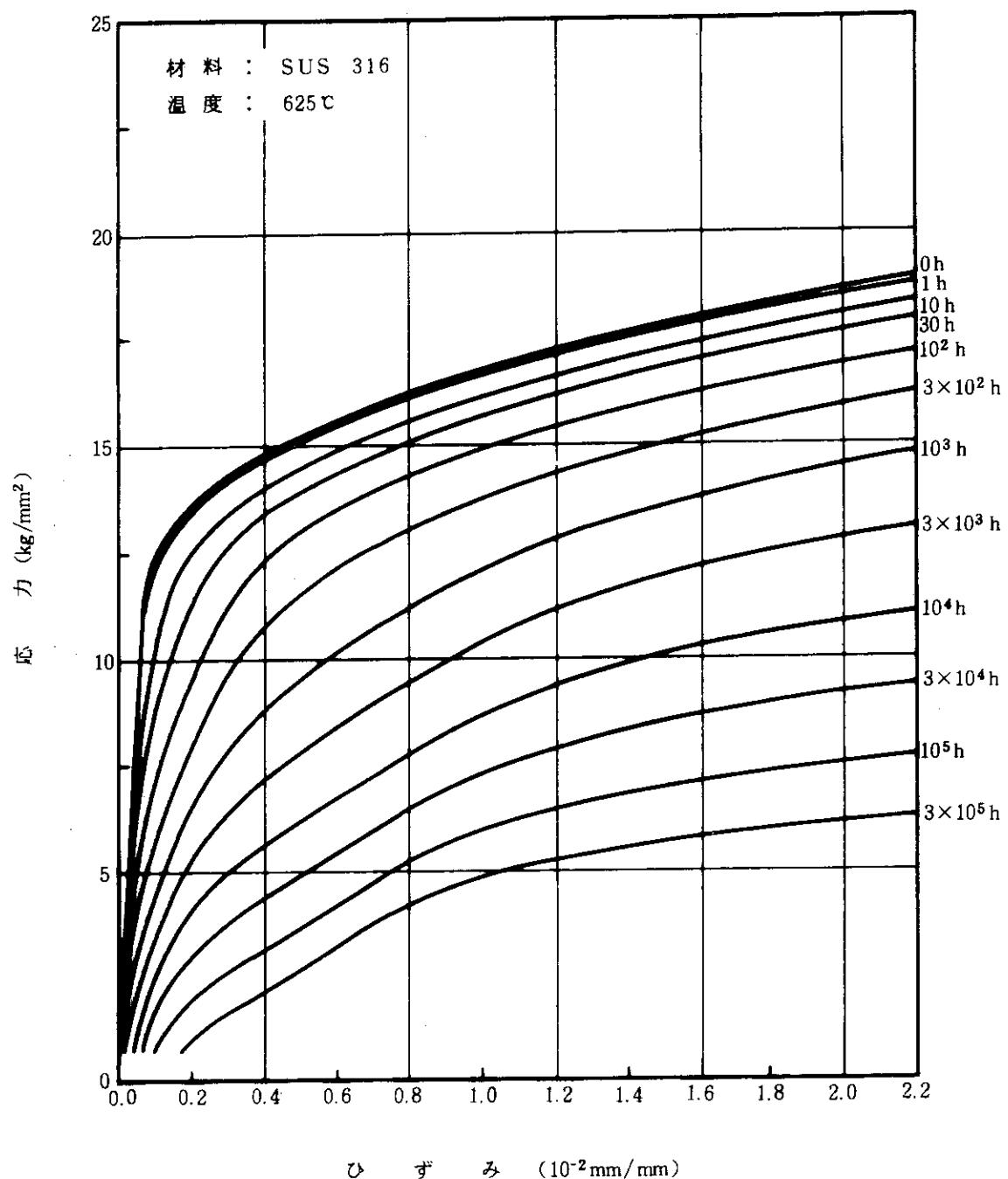
別図1.11-(e)(6) SUS 316の等時応力-ひずみ線図



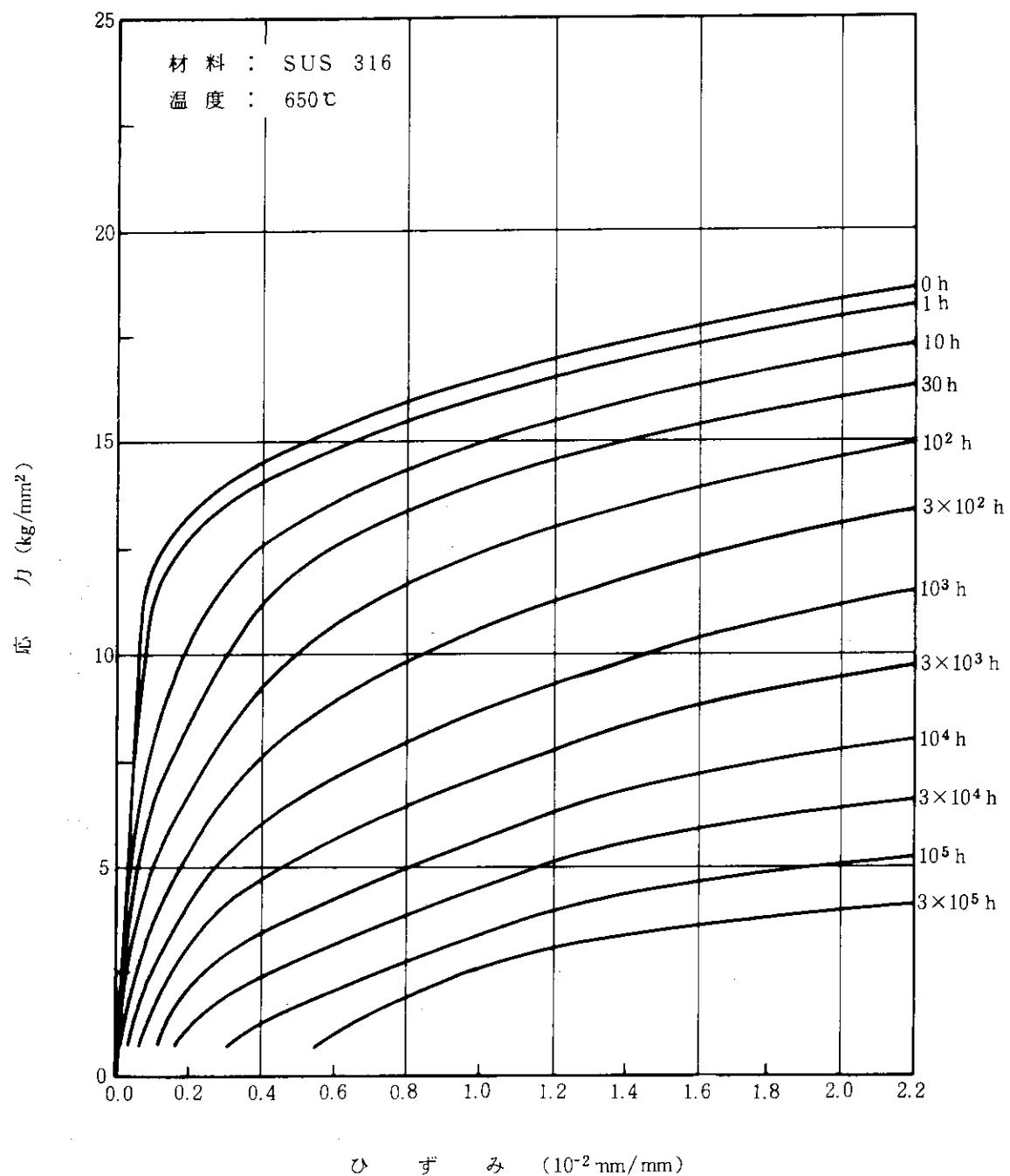
別図1.11-(e)(7) SUS 316の等時応力-ひずみ線図



別図1.11-(e)(8) SUS 316の等時応力-ひずみ線図



別図1.11-(e)(9) SUS 316の等時応力-ひずみ線図



別図1.11-(e)⑩ SUS 316の等時応力-ひずみ線図

付録MA 環境効果

付MA. 1 ヘリウム環境効果

MA. 1. 1 ヘリウムガスに接する面のくされ代

- (1) ヘリウムガスに接するハステロイX R部材にあっては、接面に次の計算式により定めるくされ代 a (μm) をとるものとする。

(i) 最高使用温度が 900°C 以下の場合には、

$$a = \frac{1}{2} d \quad (\text{MA. 1})$$

$$d^2 = 1.30 t - 200 \quad (\text{MA. 2})$$

t : 総使用時間 (h), ただし 200 時間以上。

200 時間未満の場合は $a = 0.0$ とする。

(ii) 最高使用温度が 900°C を超えて 1000°C 以下の場合には、

$$a = \frac{1}{2} d \quad (\text{MA. 3})$$

$$d^2 = 8.44 t + 2550 \quad (\text{MA. 4})$$

t : 総使用時間 (h)

- (2) ヘリウムガスに接する $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ (NT), SUS 321 伝熱管及びSUS 316 部材にあっては、ヘリウムガス接面のくされ代をとらなくてもよい。

MA. 1.2 材料強度

ヘリウムガスに接する $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ (NT), ハステロイX R, SUS 321 伝熱管及びSUS 316 にあっては、材料強度基準等として別表1(別図1)に定める材料強度基準等を特に補正することなく適用することができる。

MA. 2 中性子照射効果

材料が $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼 NT 材 HTTR 仕様材であって、最高使用温度が 450°C 以下であり、累積中性子照射量が $1 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ ($E > 1 \text{MeV}$) を超えない場合は、「高温工学試験研究炉第1種機器の高温構造設計方針」のひずみの制限及び別表1(別図1)の材料強度基準等を特に補正することなく適用することができる。

上記に該当しない場合は、運転状態を考慮して中性子照射効果を適切に評価するものとする。

付録 MB 設計応力強さ St、設計クリープ破断応力強さ S_R及び設計緩和強さ S_rの外挿値別表MB.1-(a) 2 1/4 Cr-1Mo(NT)
板の設計応力強さ（外挿値）
St (kg/mm²)

時間 h 温度 °C \	10 ⁶	3×10 ⁶
375	13.8	12.3
400	11.1	9.7
425	8.7	7.5
450	6.7	5.6
475	4.9	3.9
500	3.4	2.5
525	—	—
550	—	—

別表MB.1-(b) 2 1/4 Cr-1Mo(NT)
配管の設計応力強さ（外挿値）
St (kg/mm²)

時間 h 温度 °C \	10 ⁶	3×10 ⁶
375	13.8	12.3
400	11.1	9.7
425	8.7	7.5
450	6.7	5.6
475	4.9	3.9
500	3.4	2.5
525	—	—
550	—	—

別表MB.1-(c) ハステロイ XR の
設計応力強さ（外挿値）
St (kg/mm²)

時間 h 温度 °C \	3×10 ⁵
425	31.5
450	26.8
500	17.3
550	10.3
600	6.2
650	3.6
700	2.1
750	1.1
800	0.56
850	0.22
900	0.087
950	0.037
1000	0.019

別表MB.1-(d) SUS321伝熱管の
設計応力強さ（外挿値）
St (kg/mm²)

時間 h 温度 °C \	10 ⁶	3×10 ⁶
425	16.2	16.1
450	16.0	15.1
475	13.7	11.9
500	10.7	9.1
525	8.1	6.6
550	5.8	4.4
575	—	—
600	—	—
625	—	—
650	—	—

別表MB.1-(e) SUS316の設計
応力強さ（外挿値）
St (kg/mm²)

時間 h 温度 °C \	10 ⁶	3×10 ⁶
425	15.2	15.2
450	14.8	14.8
475	13.5	11.9
500	10.8	9.4
525	8.5	7.2
550	6.5	5.4
575	4.9	3.9
600	3.5	2.7
625	—	—
650	—	—

別表MB.2-(a) 2 1/4 Cr-1Mo(NT)
板の設計クリープ破断応力の強さ
(外挿値) S_R (kg/mm²)

時間 h 温度°C	10^6	3×10^6	10^7
375	20.6	18.4	16.1
400	16.6	14.6	12.5
425	13.1	11.2	9.4
450	10.0	8.4	6.7
475	7.4	5.9	4.4
500	5.1	3.7	—
525	3.0	—	—
550	—	—	—

別表MB.2-(b) 2 1/4 Cr-1Mo(NT)
配管の設計クリープ破断応力強さ
(外挿値) S_R (kg/mm²)

時間 h 温度°C	10^6	3×10^6	10^7
375	20.6	18.4	16.1
400	16.6	14.6	12.5
425	13.1	11.2	9.4
450	10.0	8.4	6.7
475	7.4	5.9	4.4
500	5.1	3.7	—
525	3.0	—	—
550	—	—	—

別表MB.2-(c) ハステロイXRの設計
クリープ破断応力強さ(外挿値)
 S_R (kg/mm²)

時間 h 温度°C	3×10^5	10^6	3×10^6
425	49.2	49.2	44.0
450	44.3	38.0	33.0
500	26.0	22.0	18.7
550	15.5	12.9	10.8
600	9.3	7.6	6.2
650	5.6	4.4	3.5
700	3.3	2.5	1.9
750	1.9	1.3	0.93
800	1.0	0.66	0.45
850	0.52	0.34	0.23
900	0.28	0.19	0.13
950	0.16	0.11	0.072
1000	0.11	0.06	0.043

別表MB.2-(d) SUS321伝熱管の設
計クリープ破断応力強さ(外挿値)
 S_R (kg/mm²)

時間 h 温度°C	10^6	3×10^6	10^7
425	31.5	28.1	24.7
450	25.7	22.6	19.5
475	20.6	17.8	15.0
500	16.1	13.6	11.0
525	12.2	9.9	7.5
550	8.7	6.6	—
575	5.6	—	—
600	—	—	—
625	—	—	—
650	—	—	—

別表MB.2-(e) SUS316の設計クリー
プ破断応力強さ(外挿値)
 S_R (kg/mm²)

時間 h 温度°C	10^6	3×10^6	10^7
425	30.6	27.5	24.3
450	25.1	22.3	19.5
475	20.3	17.8	15.4
500	16.2	14.1	11.9
525	12.7	10.8	9.0
550	9.8	8.1	6.6
575	7.3	5.9	4.5
600	5.3	4.0	2.9
625	3.5	2.5	—
650	2.1	—	—

別表M B.3 -(a) 2 1/4 Cr - 1 Mo(NT)
板の設計緩和強さ (外挿値)
 S_r (kg / mm²)

時間h 温度°C	10^6	3×10^6	10^7
375	13.0	12.3	11.2
400	10.1	9.2	7.9
425	7.2	6.2	5.0
450	4.5	3.6	2.4
475	2.1	0.8	—
500	—	—	—
525	—	—	—
550	—	—	—

別表M B.3 -(b) 2 1/4 Cr - 1 Mo(NT)
配管の設計緩和強さ (外挿値)
 S_r (kg / mm²)

時間h 温度°C	10^6	3×10^6	10^7
375	11.4	10.8	10.3
400	8.9	8.4	7.5
425	6.5	5.8	4.8
450	4.0	3.3	2.3
475	1.6	0.4	—
500	—	—	—
525	—	—	—
550	—	—	—

別表M B.3 -(c) ハステロイ
X Rの設計緩和強さ
(外挿値) S_r (kg/mm²)

時間h 温度°C	3×10^5
450	14.0
500	14.0
550	7.9
600	4.3
650	0.87
700	0.76
750	0.32
800	0.05

別表M B.3 -(d) SUS 321 伝熱管の
設計緩和強さ (外挿値)
 S_r (kg / mm²)

時間h 温度°C	10^6	3×10^6	10^7
425	13.8	12.7	11.0
450	11.4	9.8	8.2
475	8.6	7.1	5.9
500	6.0	4.9	4.1
525	3.9	3.1	2.3
550	1.7	0.1	—
575	—	—	—
600	—	—	—
625	—	—	—
650	—	—	—

別表M B.3 -(e) SUS 316 の設計
 緩和強さ (外挿値)
 S_r (kg / mm²)

時間 h 温度 °C \	10 ⁶	3×10^6	10 ⁷
425	15.6	14.9	13.9
450	13.2	12.1	11.0
475	10.0	8.8	7.8
500	6.8	5.6	4.7
525	3.9	3.0	2.1
550	1.7	0.8	—
575	—	—	—
600	—	—	—
625	—	—	—
650	—	—	—

付録MC 累積クリープ疲労損傷係数の制限値D

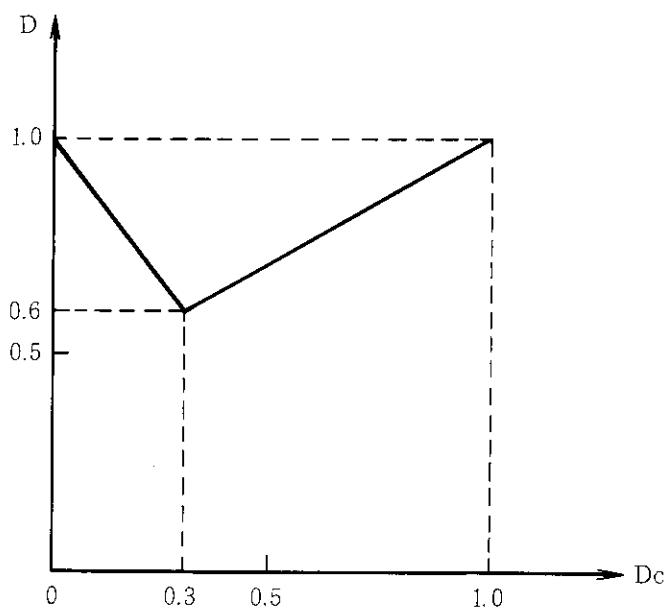
累積クリープ疲労損傷係数の制限値Dは次により定めるものとする。

材 料

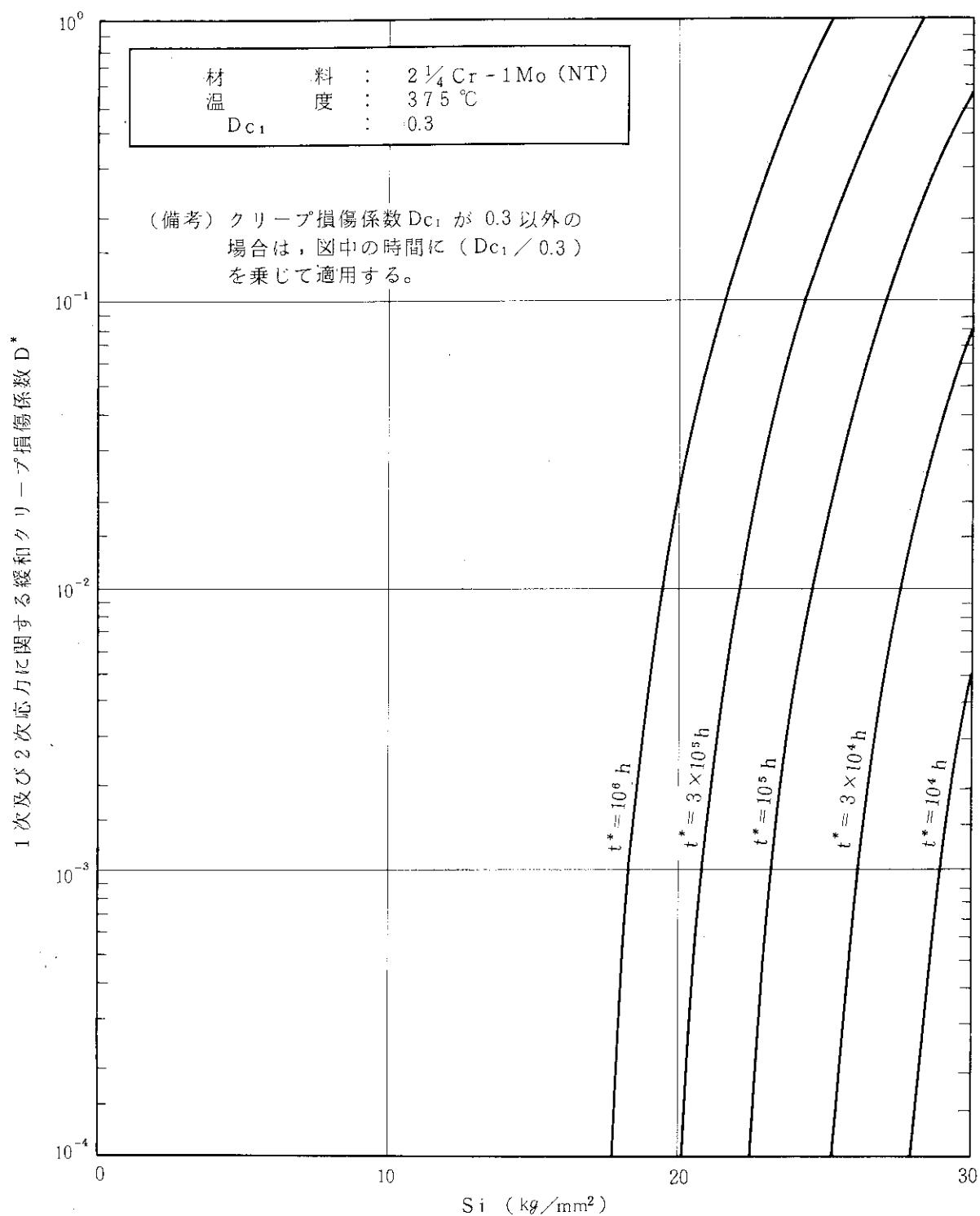
2 1/4 Cr-1Mo (NT)
SUS 321 伝熱管及びSUS 316
ハスチロイ X R

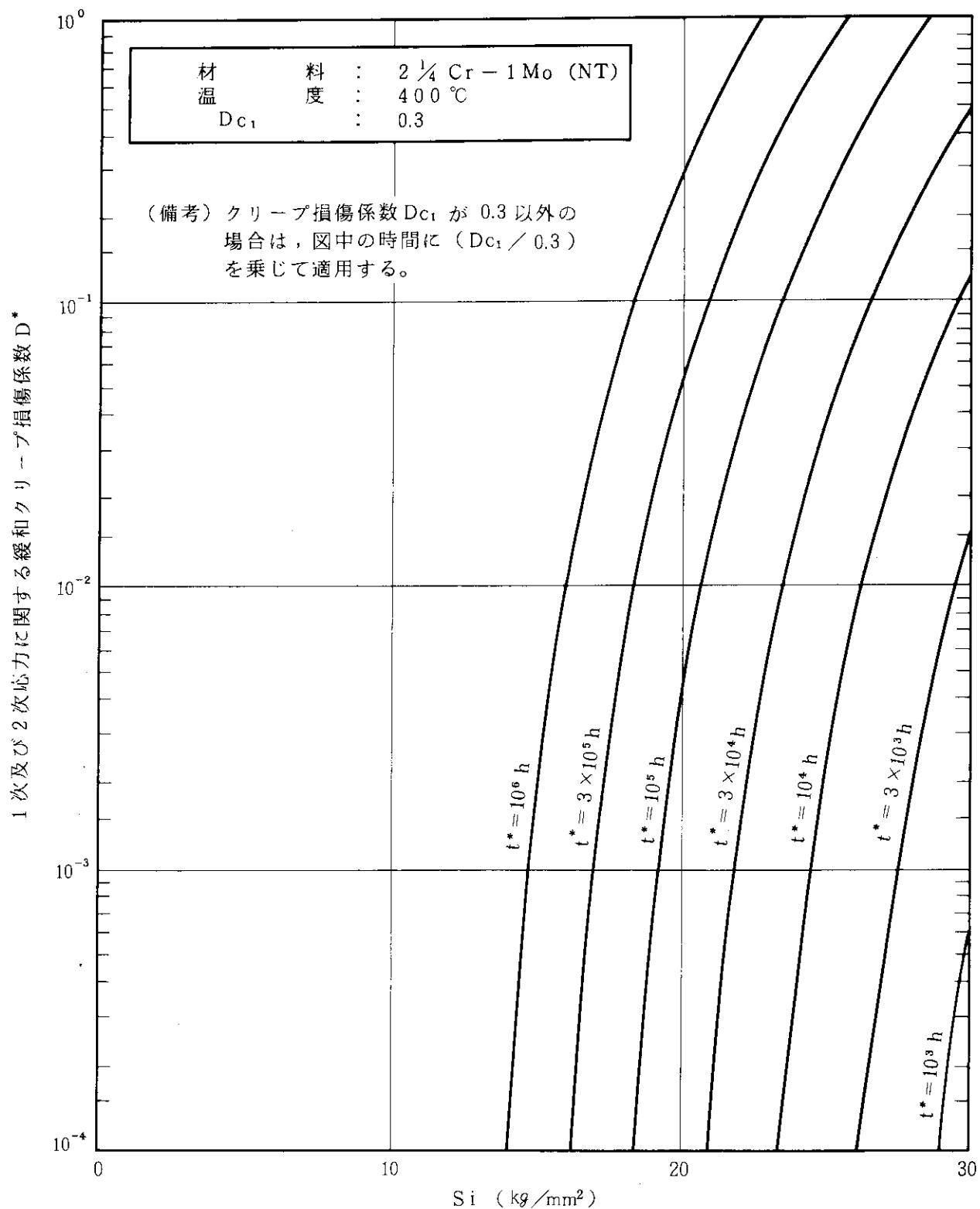
} 図C.1による。

D = 1.0 とする。

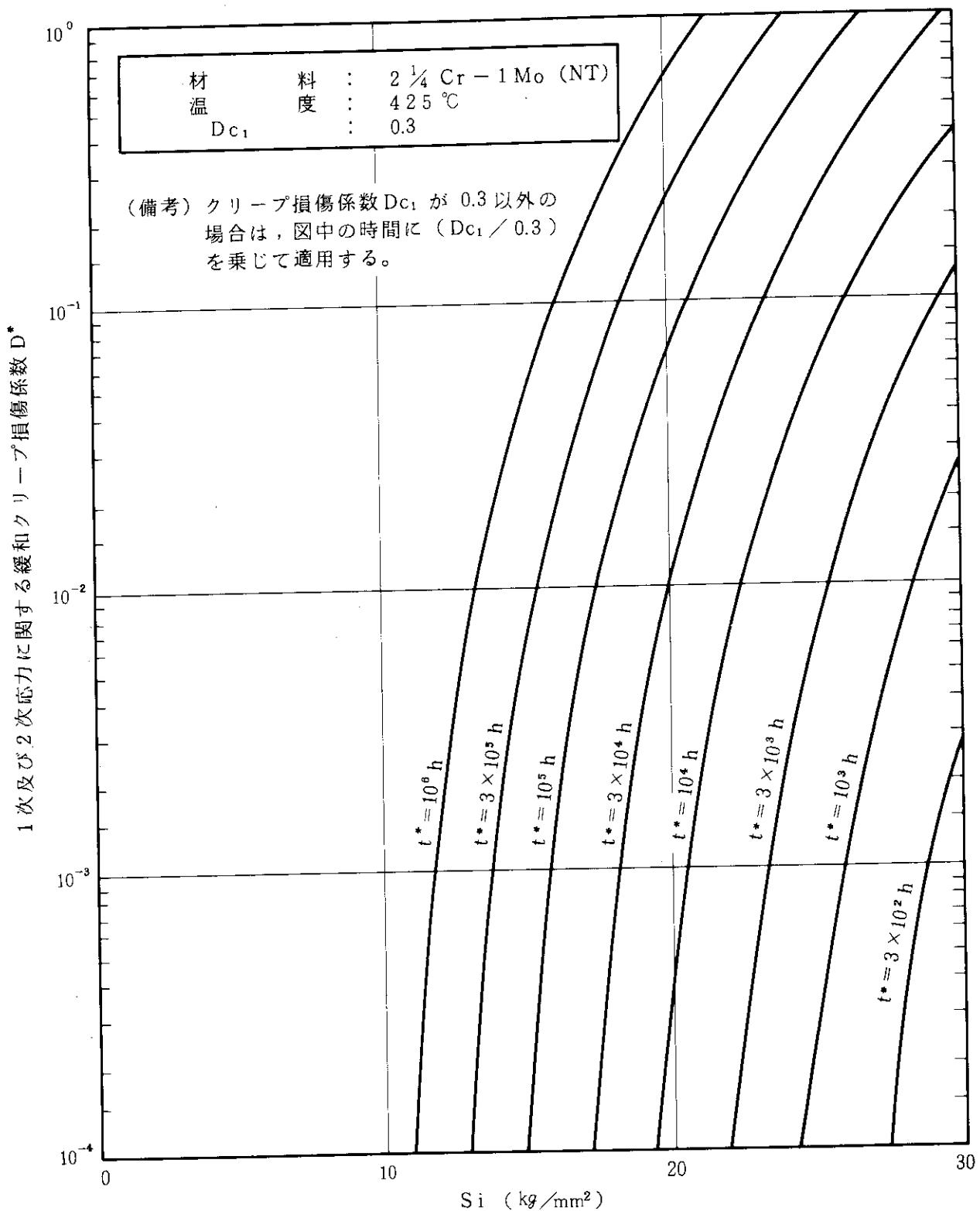


図C.1 累積クリープ疲労損傷係数の制限値D

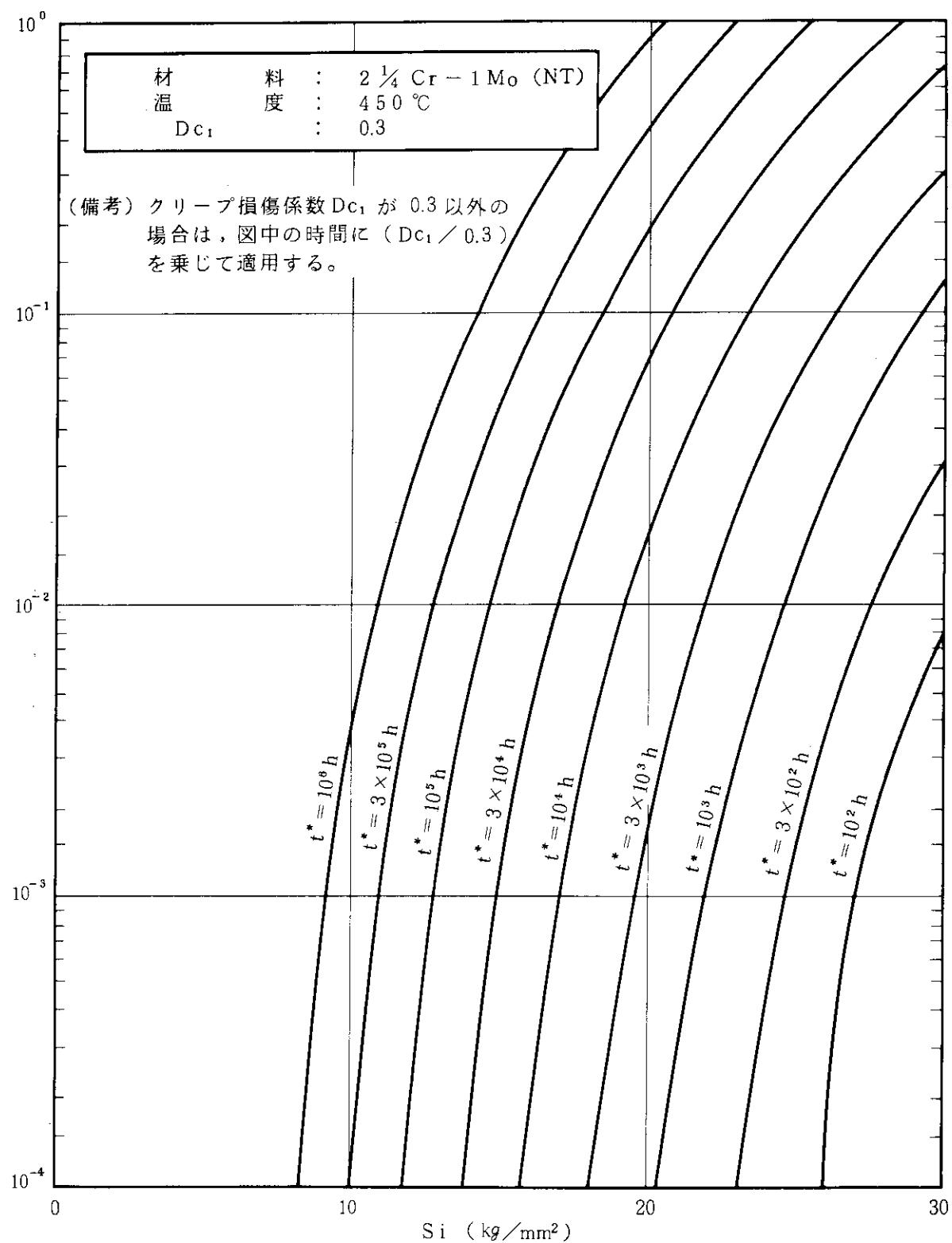
付録MD 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^* 別図MD.1-(a),(b)-① 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*
(2 1/4 Cr - 1 Mo(NT), $D_{c1} = 0.3$)

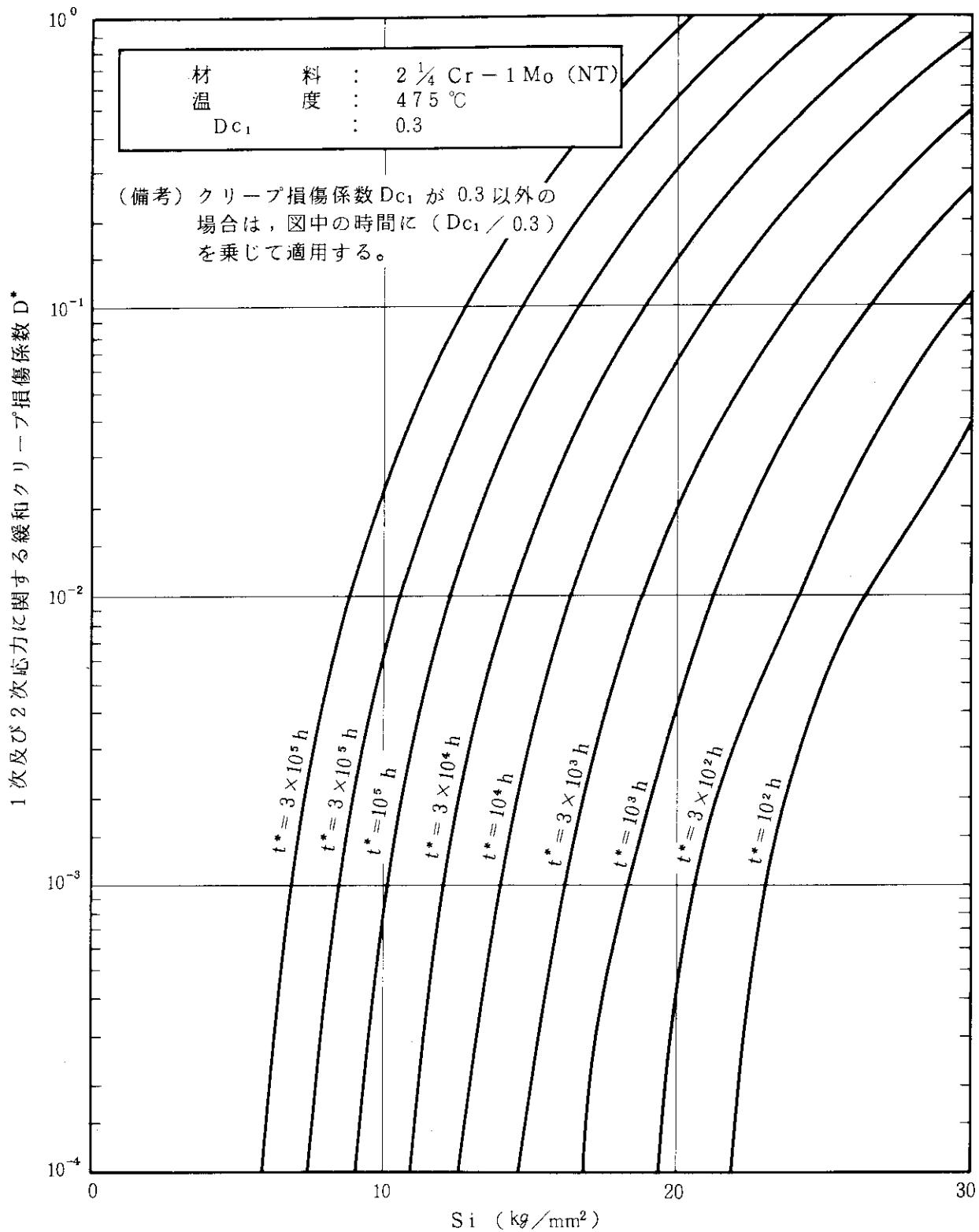


別図MD.1-(a),(b)-② 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*
 $(2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}(\text{NT}), D_{c1} = 0.3)$

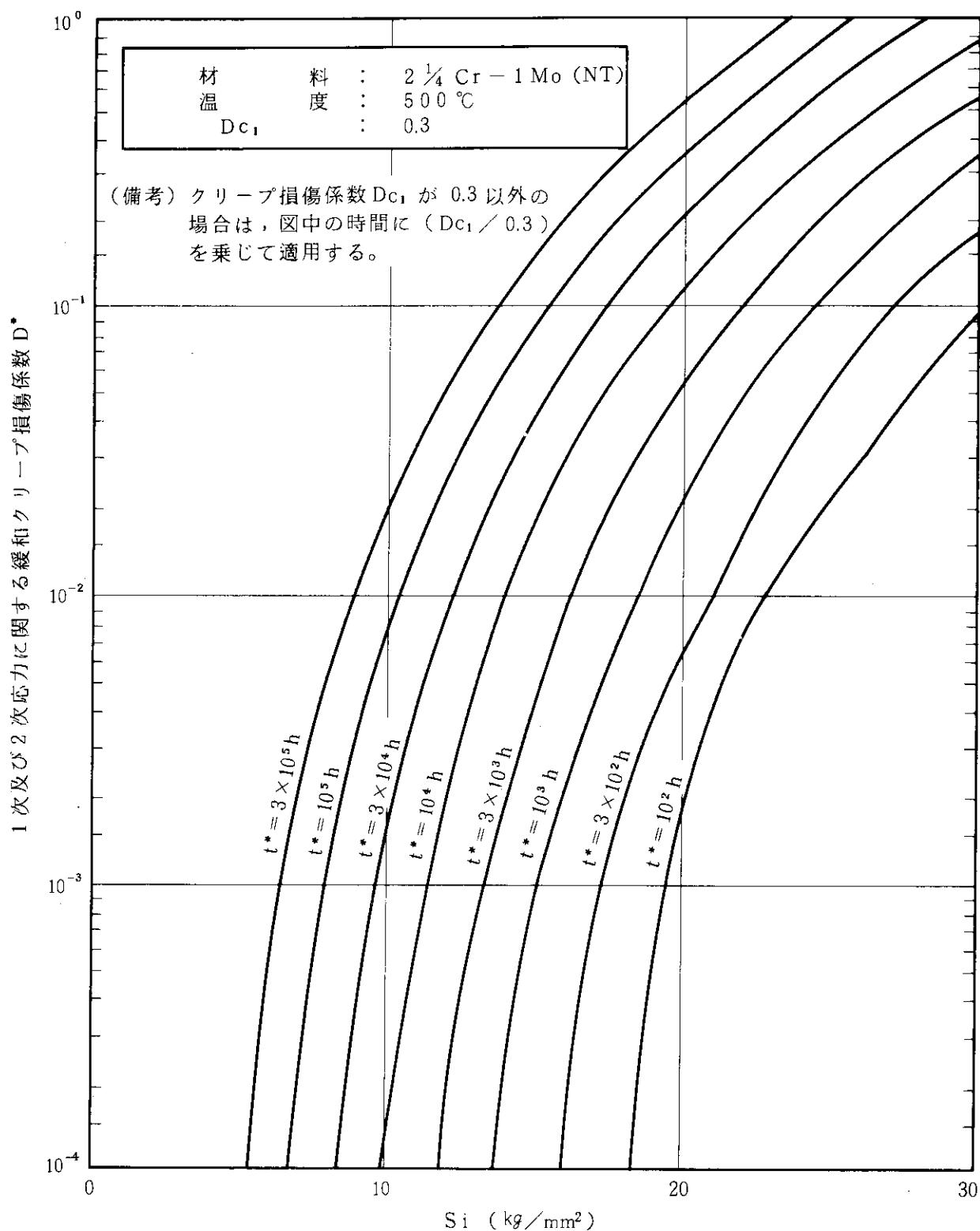


別図MD.1-(a),(b)-③ 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*
($2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ (NT), $D_{c1} = 0.3$)

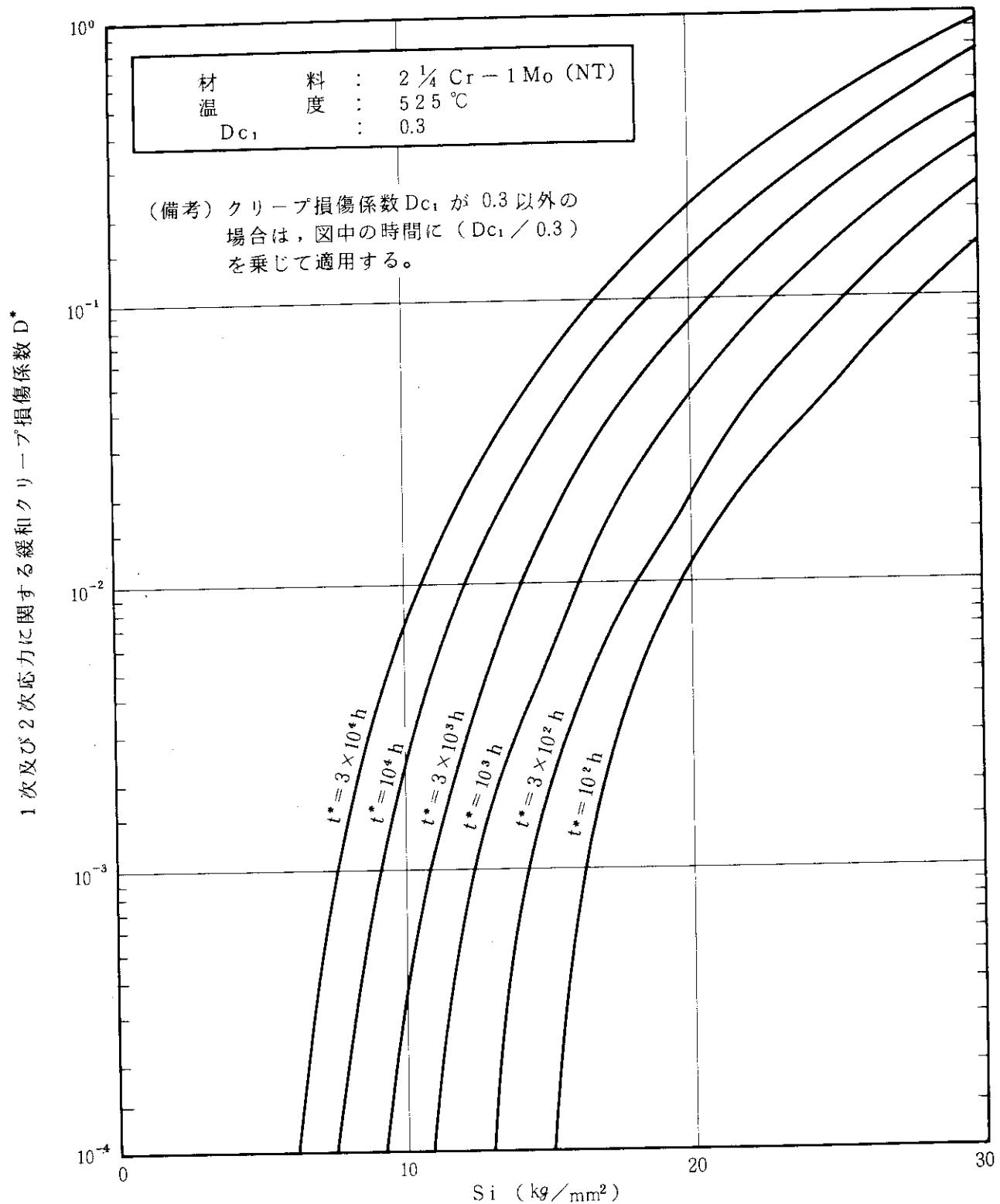
1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^* 別図MD.1-(a),(b)-④ 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*
(2 1/4 Cr - 1 Mo (NT), $D_{c1} = 0.3$)



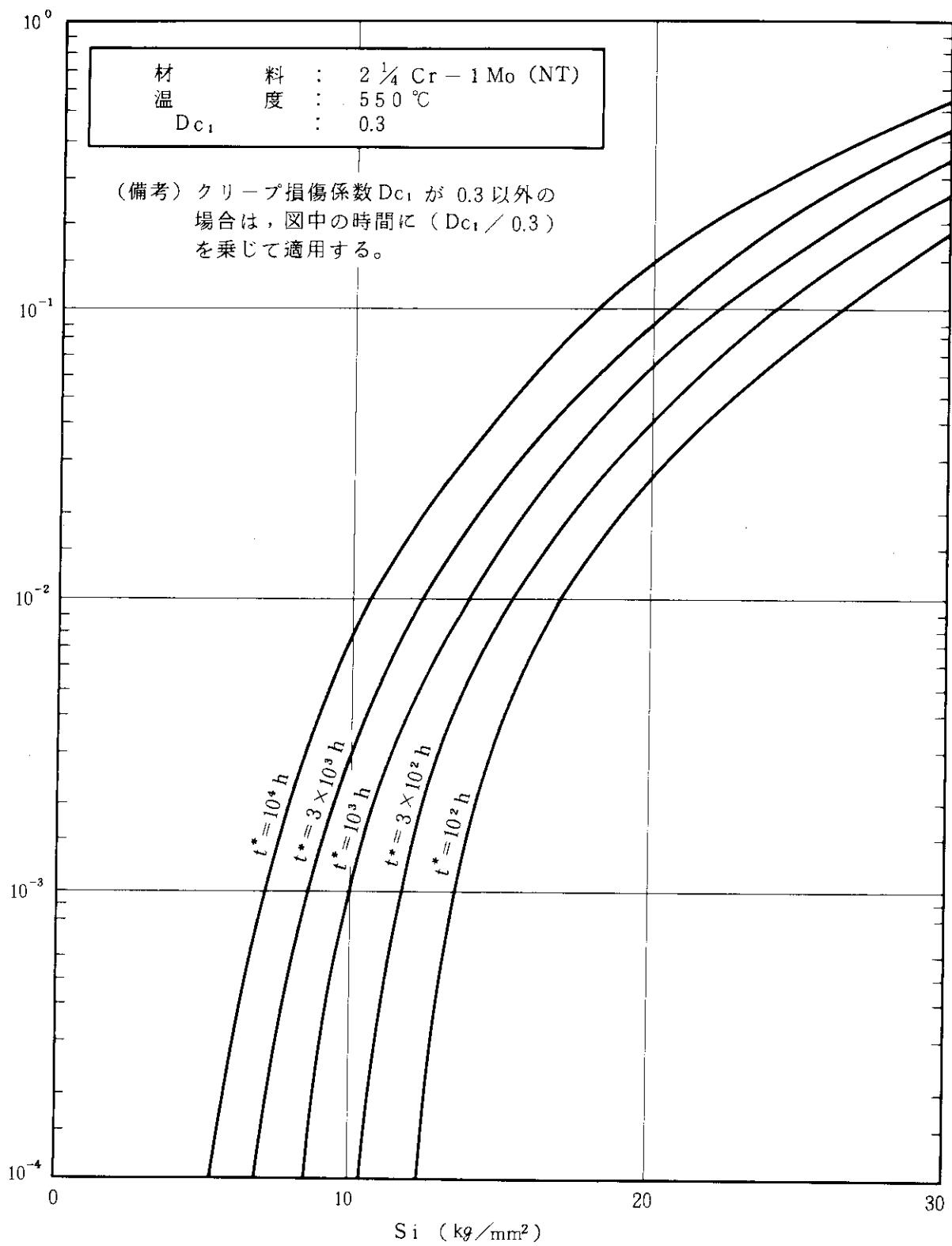
別図MD.1-(a),(b)-⑤ 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*
 (2 $\frac{1}{4}$ Cr - 1 Mo(NT), $D_{c1} = 0.3$)



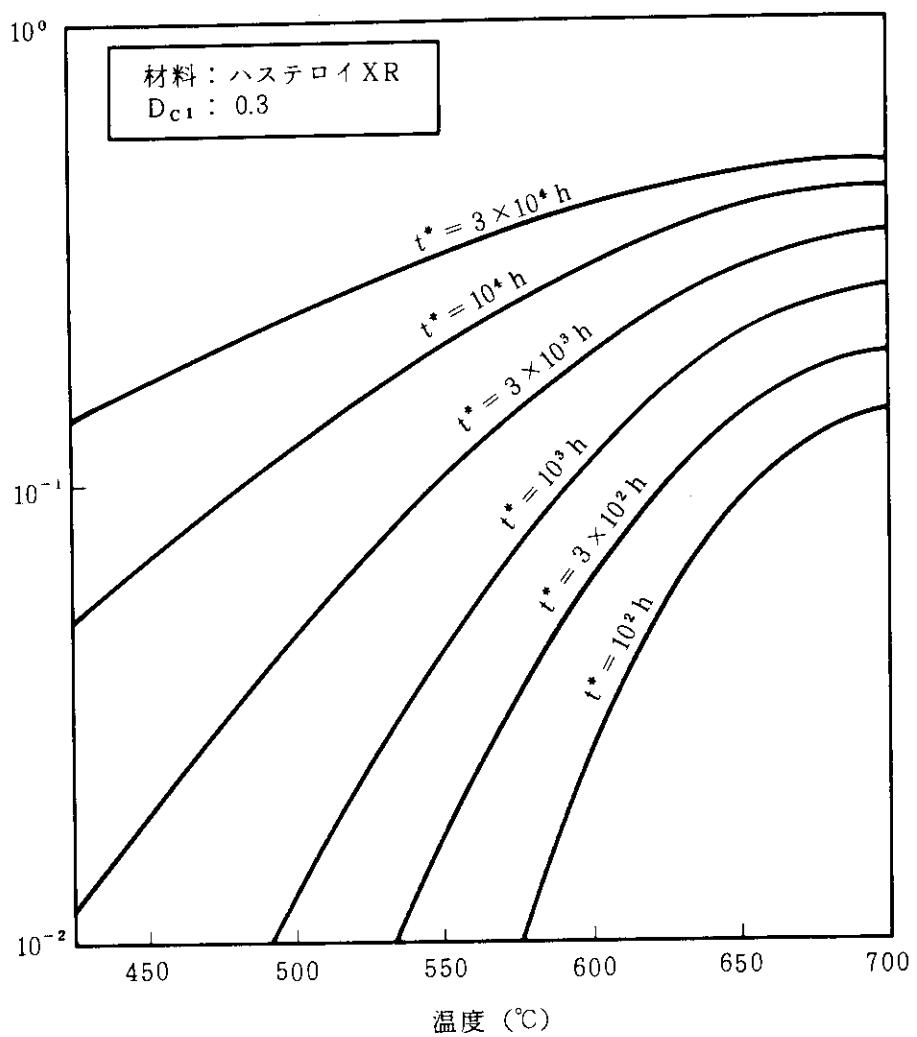
別図MD.1-(a),(b)-⑥ 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*
 (2 $\frac{1}{4}$ Cr - 1 Mo (NT), $D_{c1} = 0.3$)



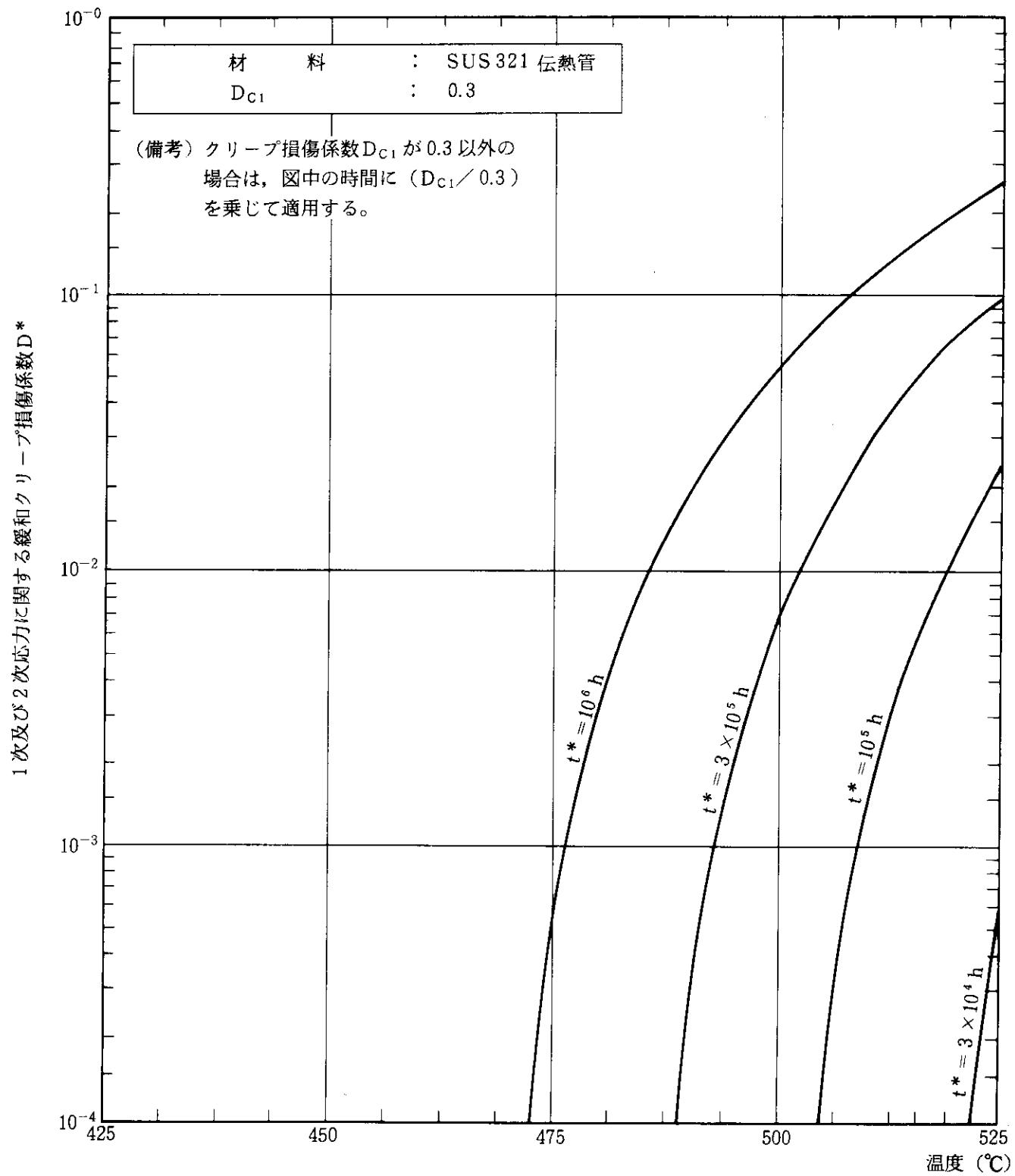
別図MD.1-(a),(b)-⑦ 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*
($2 \frac{1}{4} \text{Cr} - 1 \text{Mo} (\text{NT})$, $D_{c_1} = 0.3$)

1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^* 別図MD.1-(a),(b)-⑧ 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*
(2 1/4 Cr - 1 Mo(NT), $D_{c1} = 0.3$)

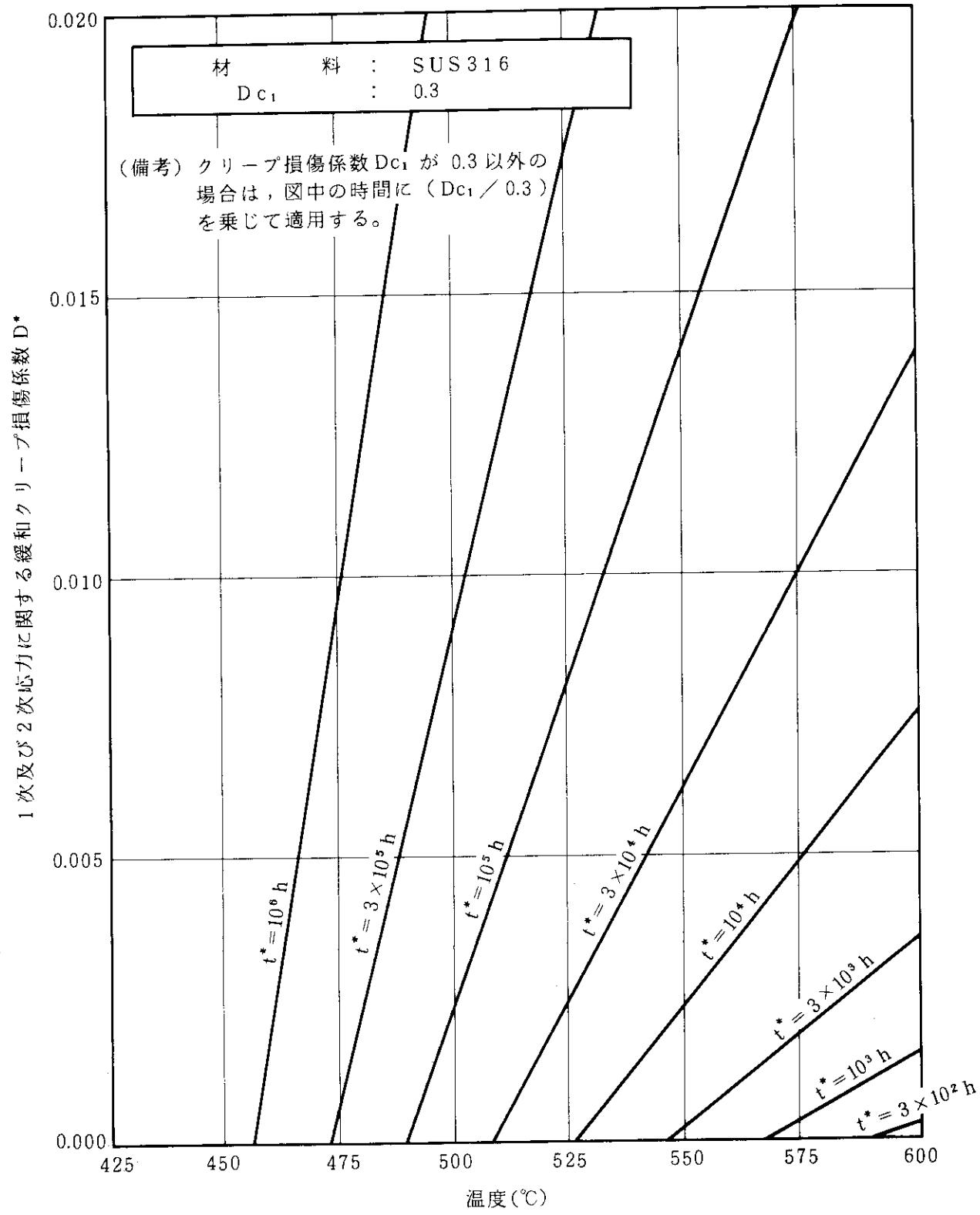
(備考) クリープ損傷係数 D_{c1} が 0.3 以外の場合は、図中の時間に $(D_{c1}/0.3)$ を乗じて適用する。

1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^* 

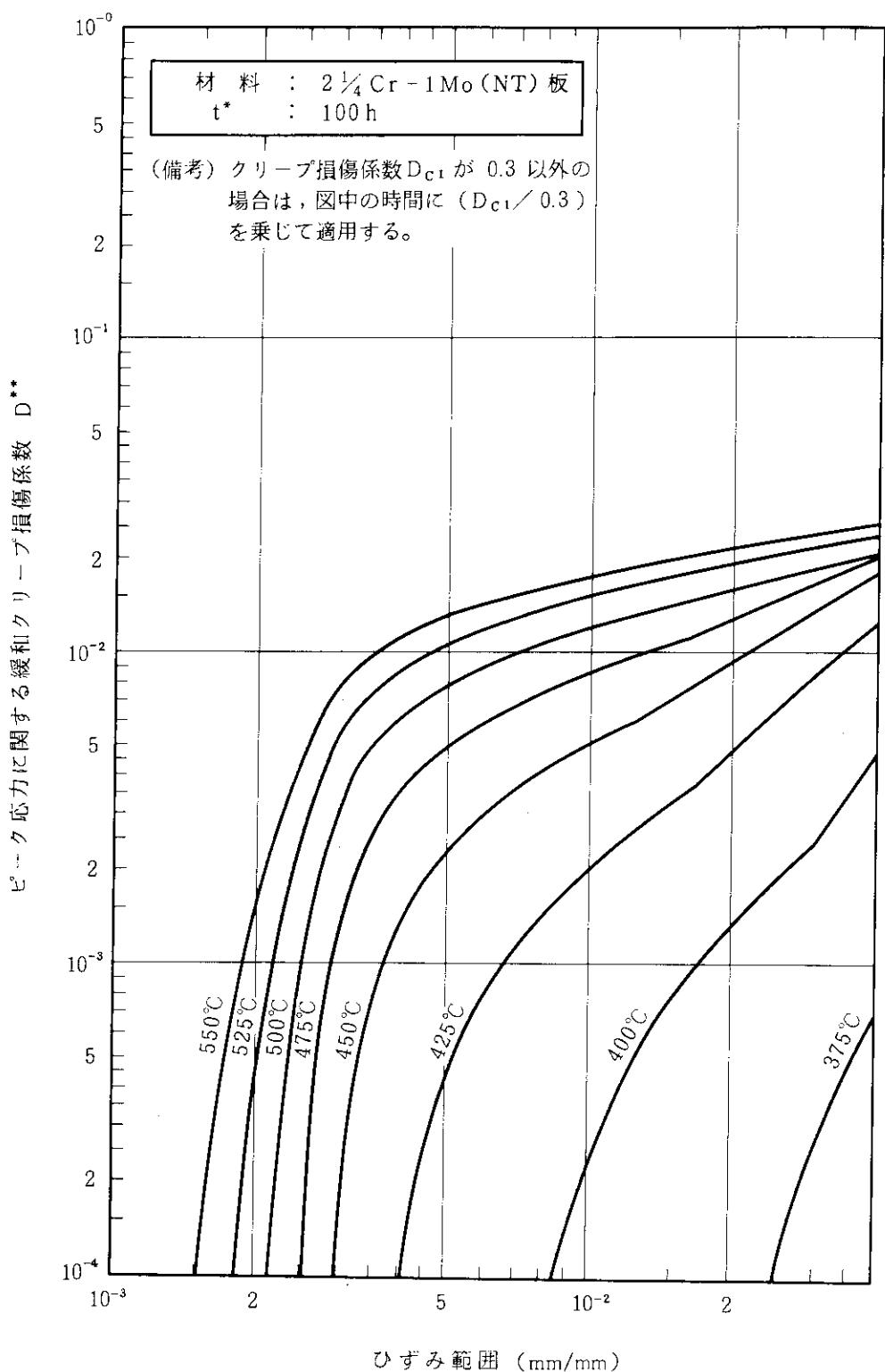
別図MD.1-(c) 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*
(ハイテロイ XR, $D_{c1} = 0.3$)

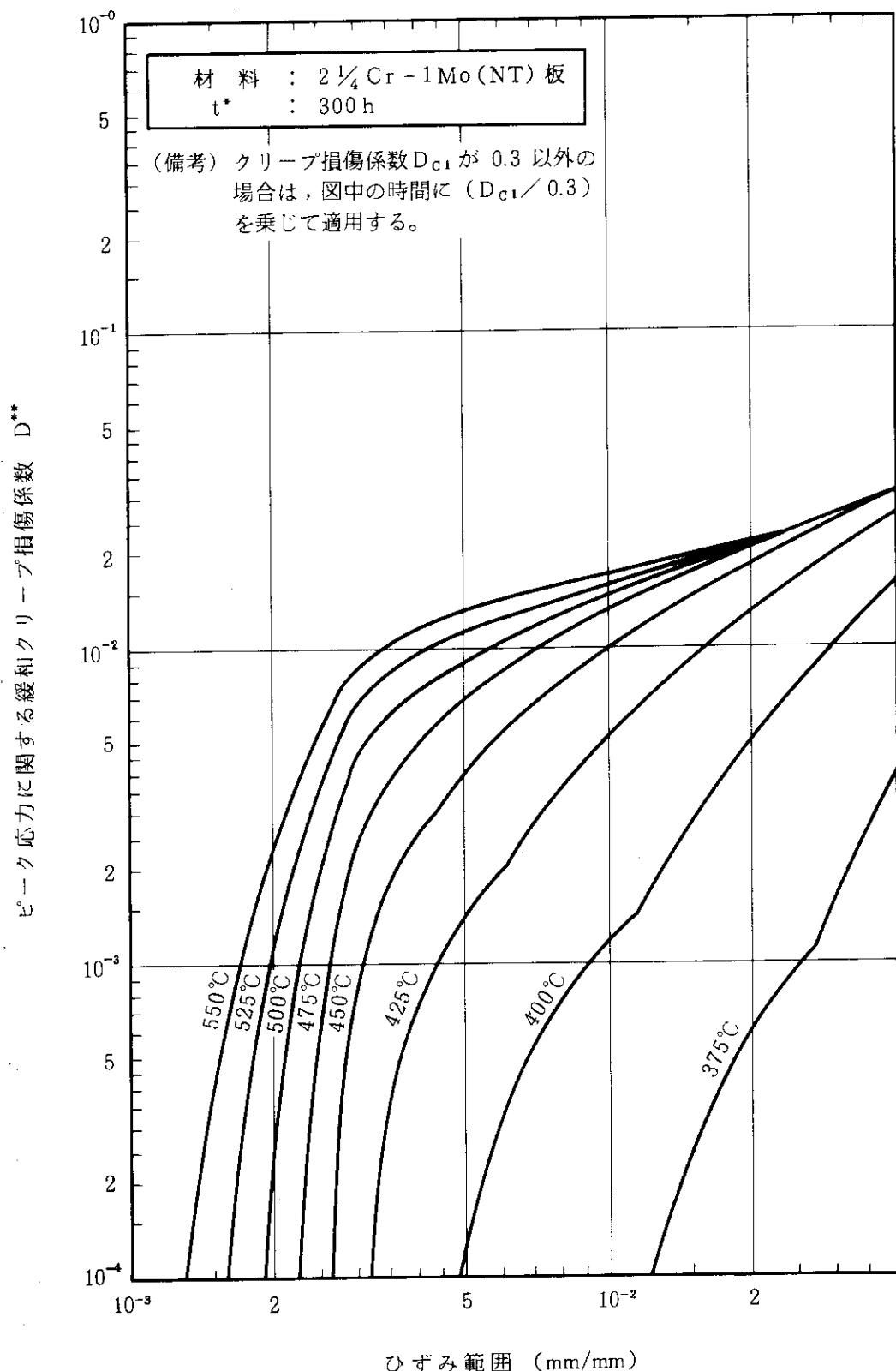


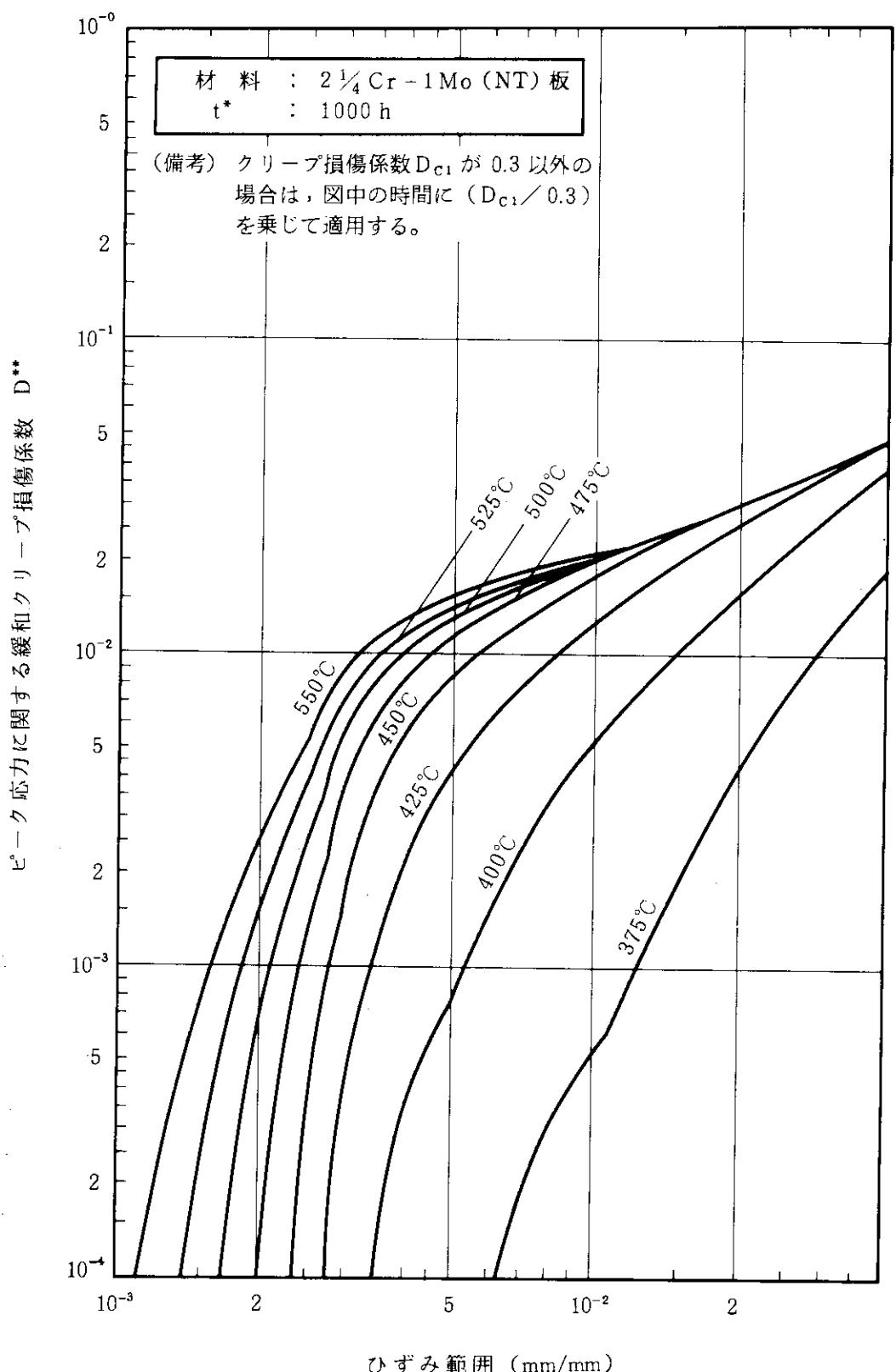
別図MD.1-(d) 1次及び2次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*
(SUS 321 伝熱管, $D_{C1} = 0.3$)

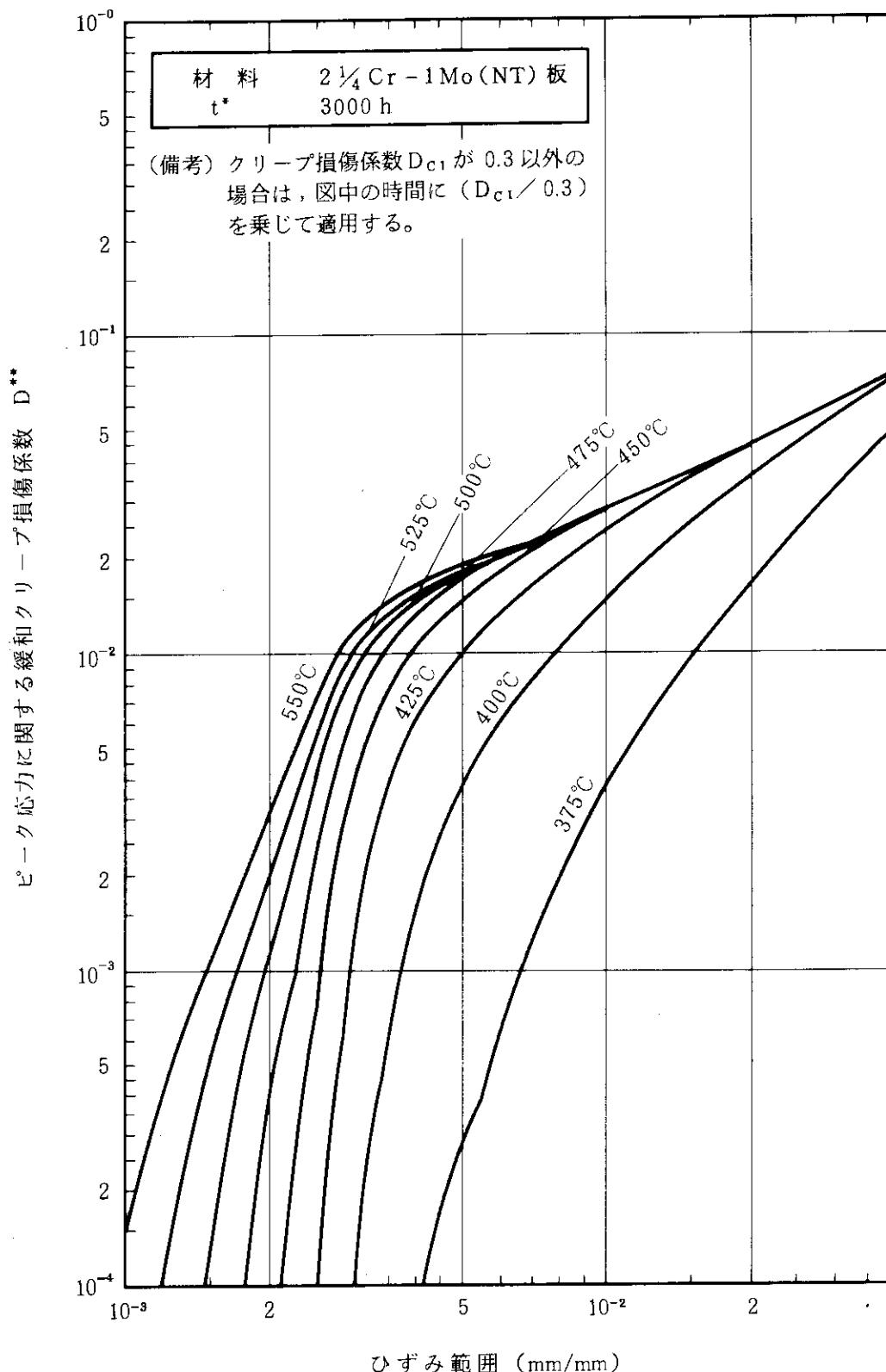


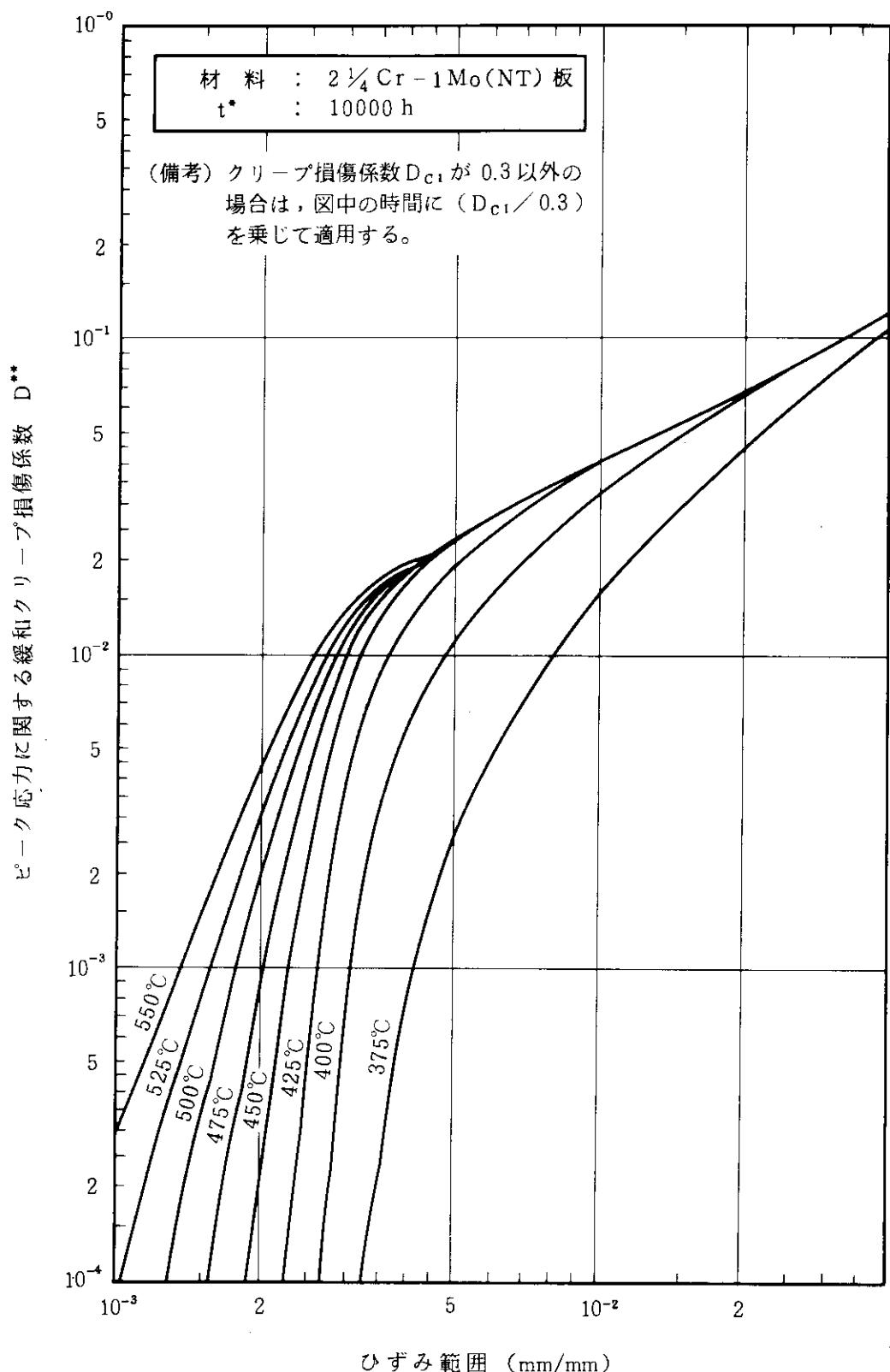
別図 MD.1-(e) 1 次及び 2 次応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^*
(SUS 316, $D_{c1} = 0.3$)

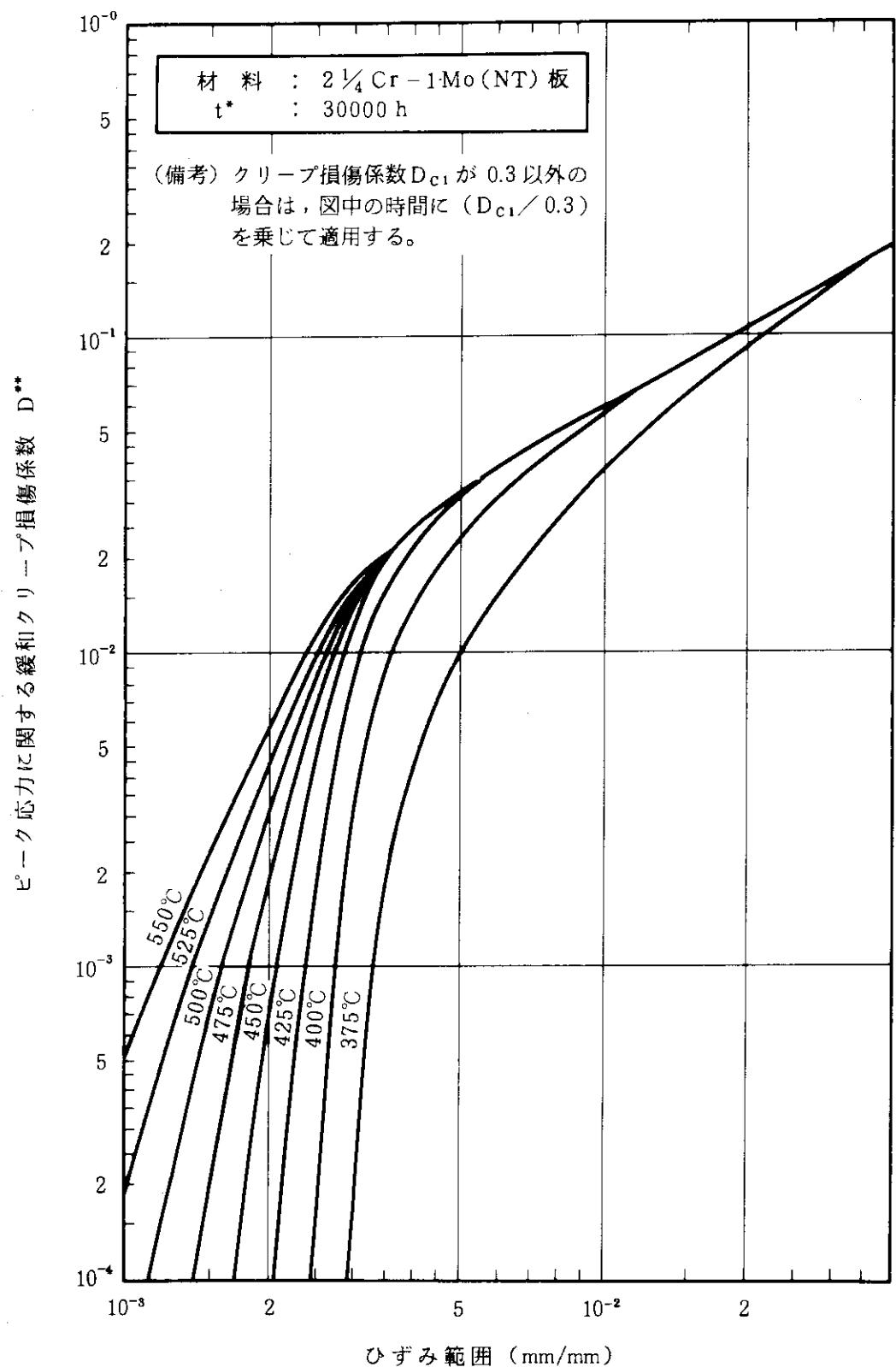
付録ME ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**} 別図ME.1-(a)-(1) $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ (NT) 板のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

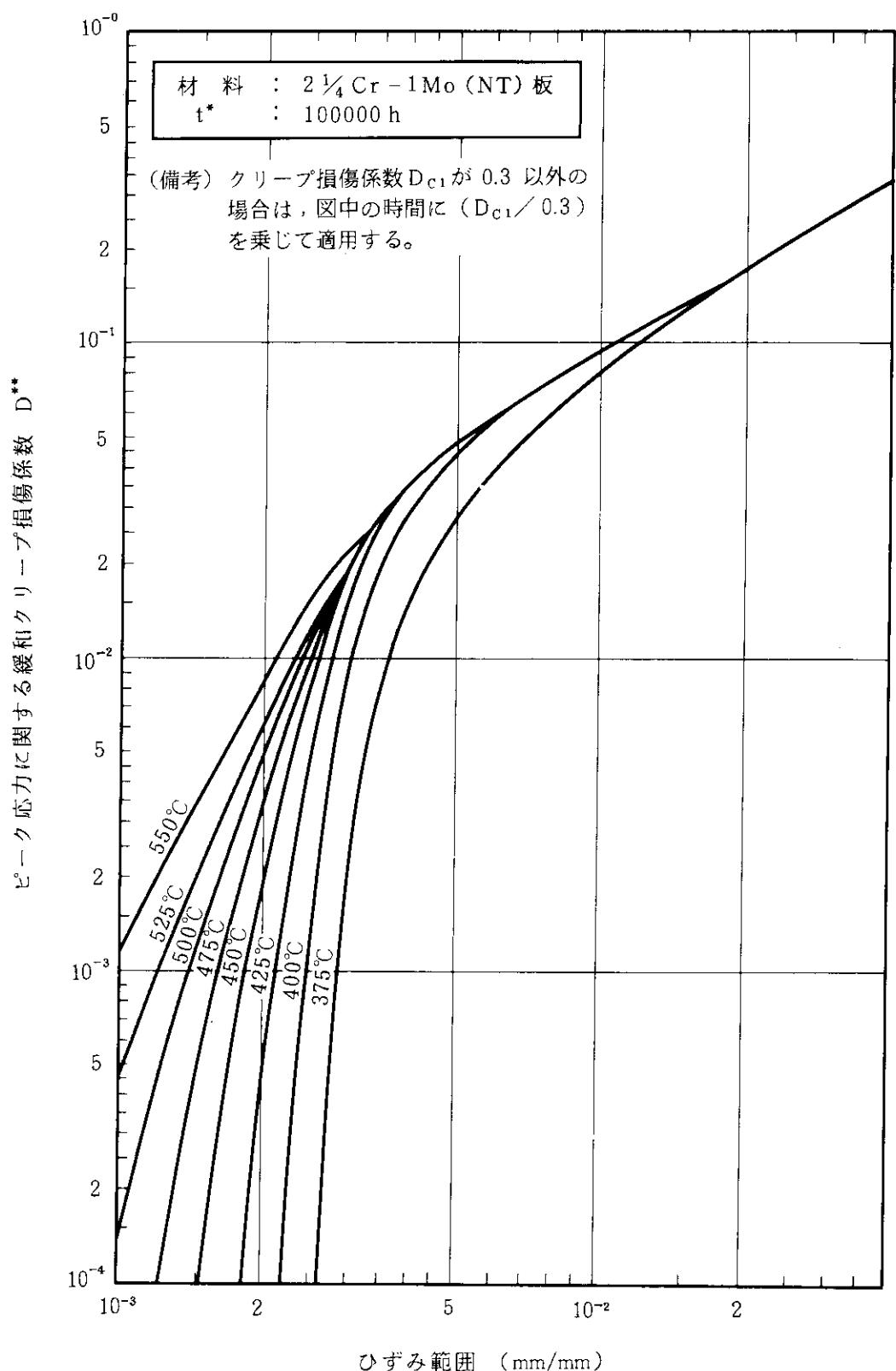
別図ME.1-(a)-(2) 2 1/4 Cr - 1 Mo (NT) 板のピーカ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

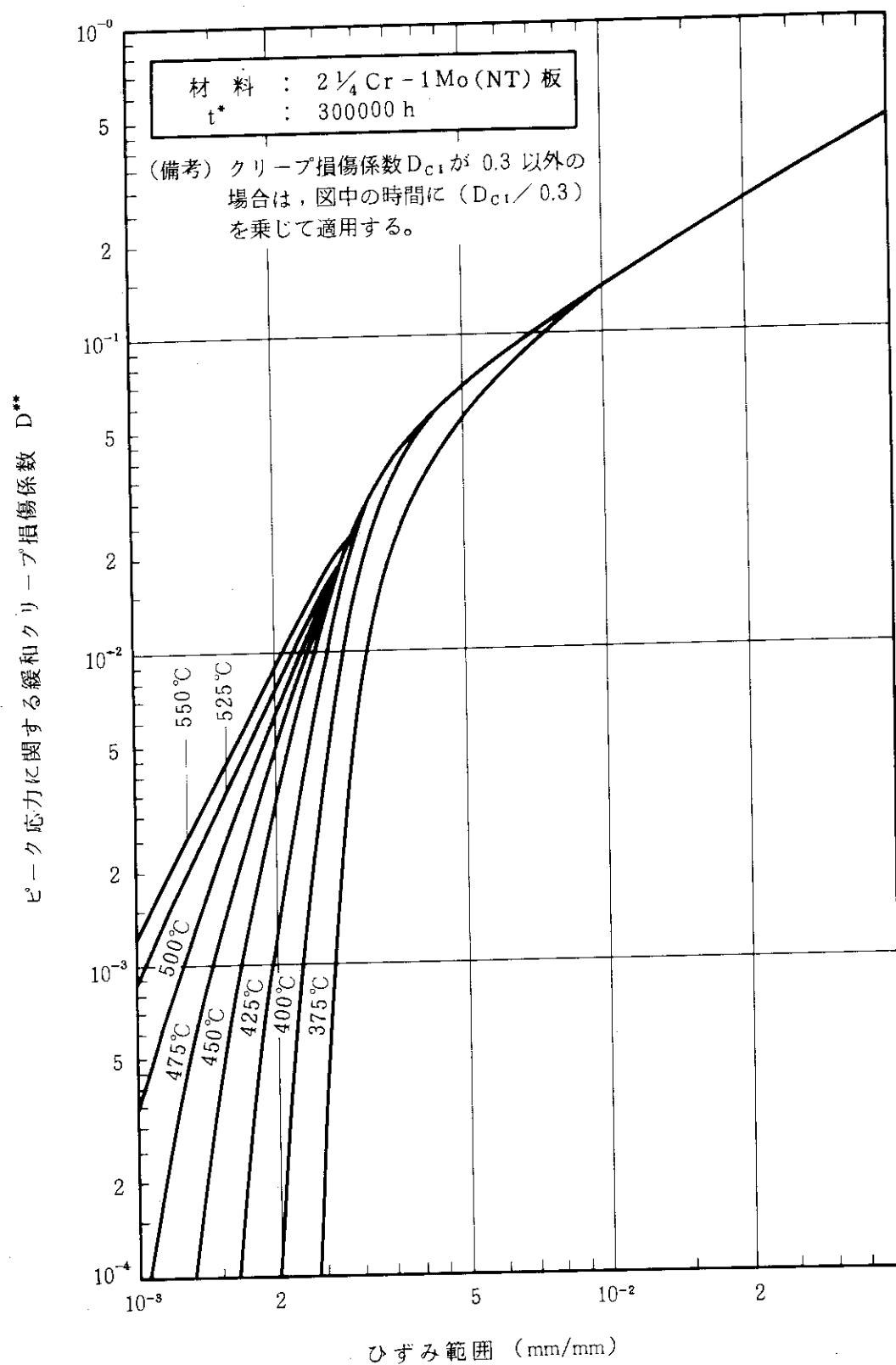
別図ME.1-(a)-(3) $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ (NT) 板のピーカ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

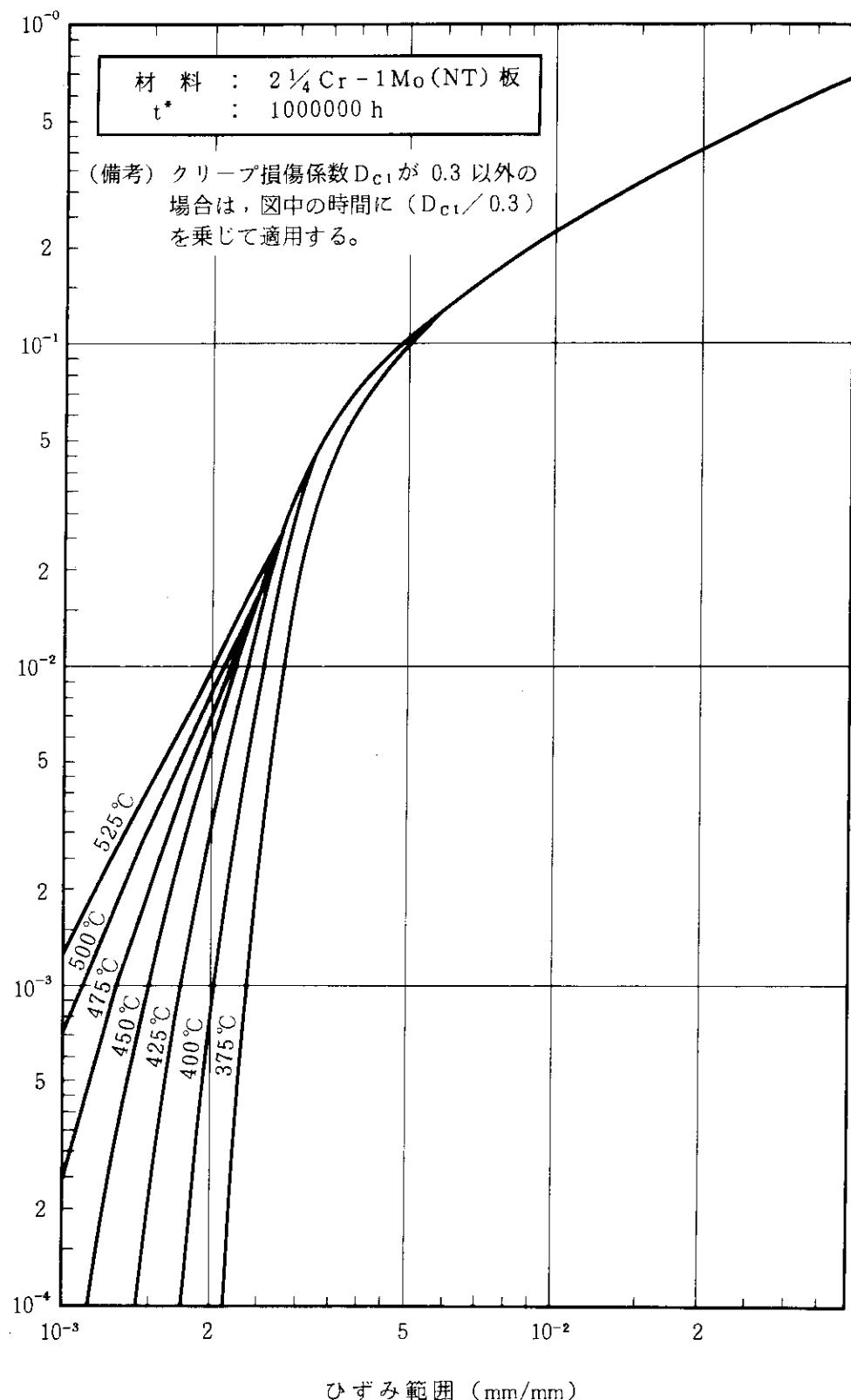
別図ME.1-(a)-(4) $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}(\text{NT})$ 板のピーカ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

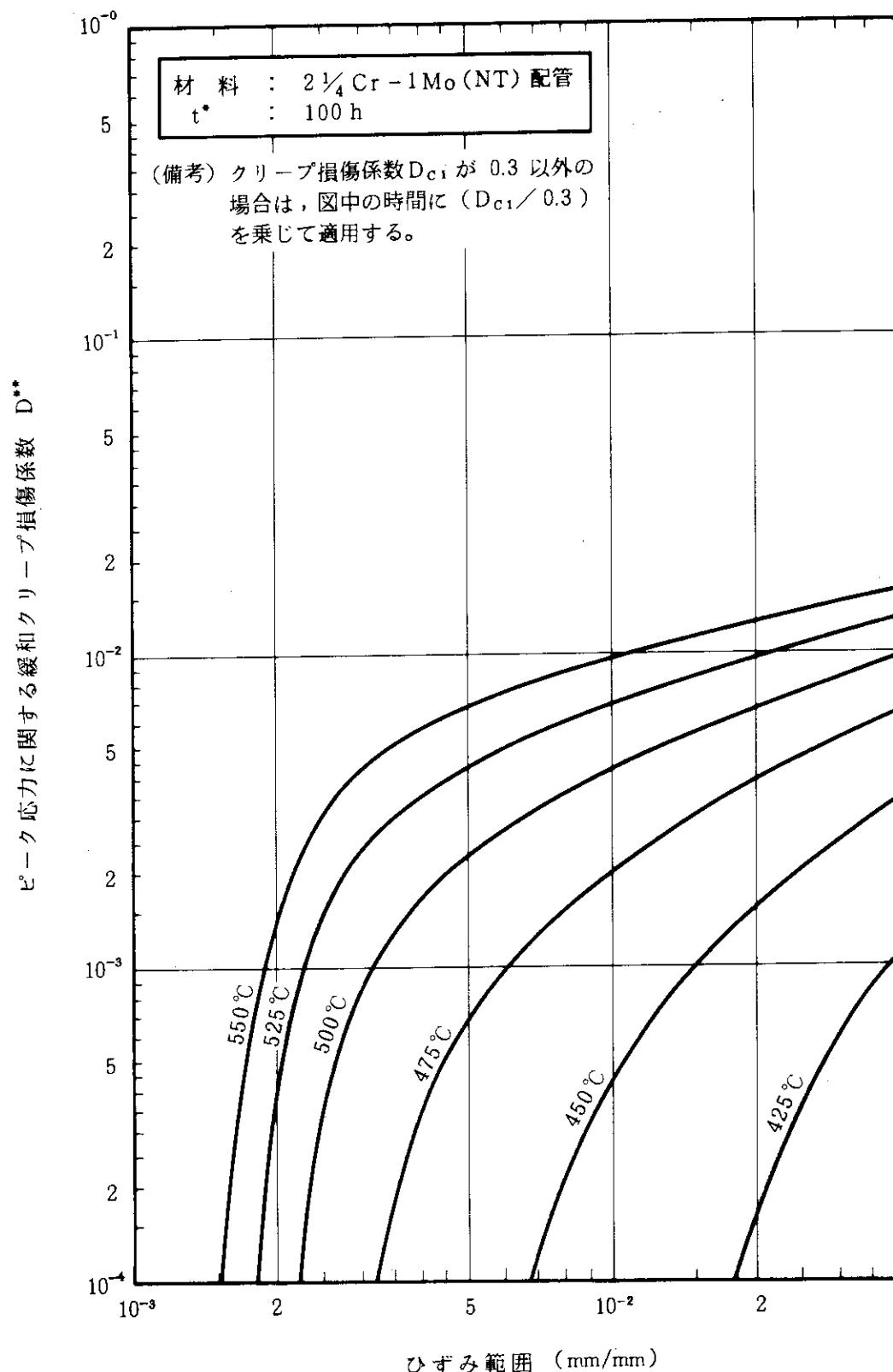
別図ME.1-(a)-⑤ $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ (NT)板のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

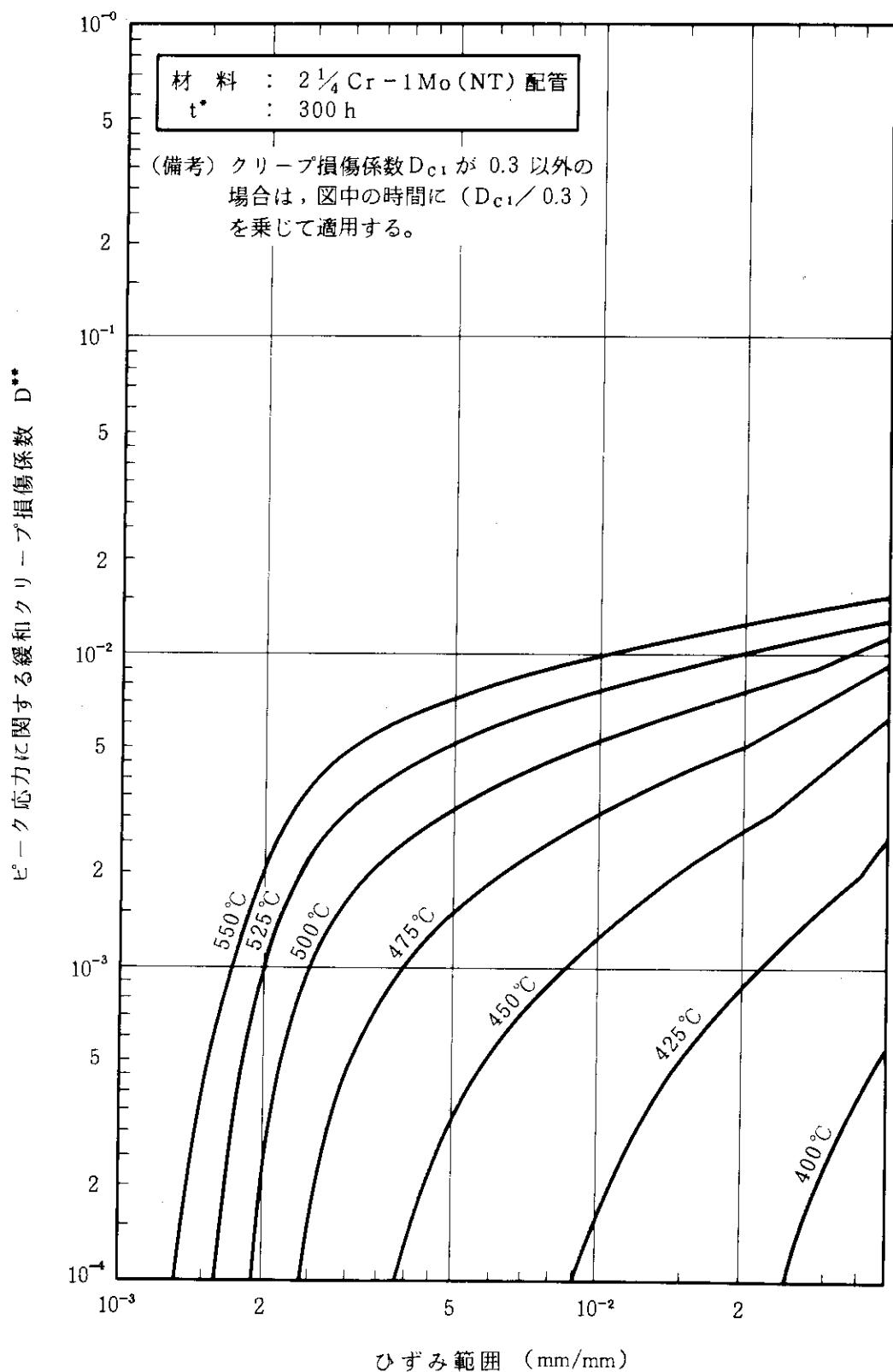
別図ME.1-(a)-(6) $2\frac{1}{4}$ Cr - 1 Mo (NT) 板のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

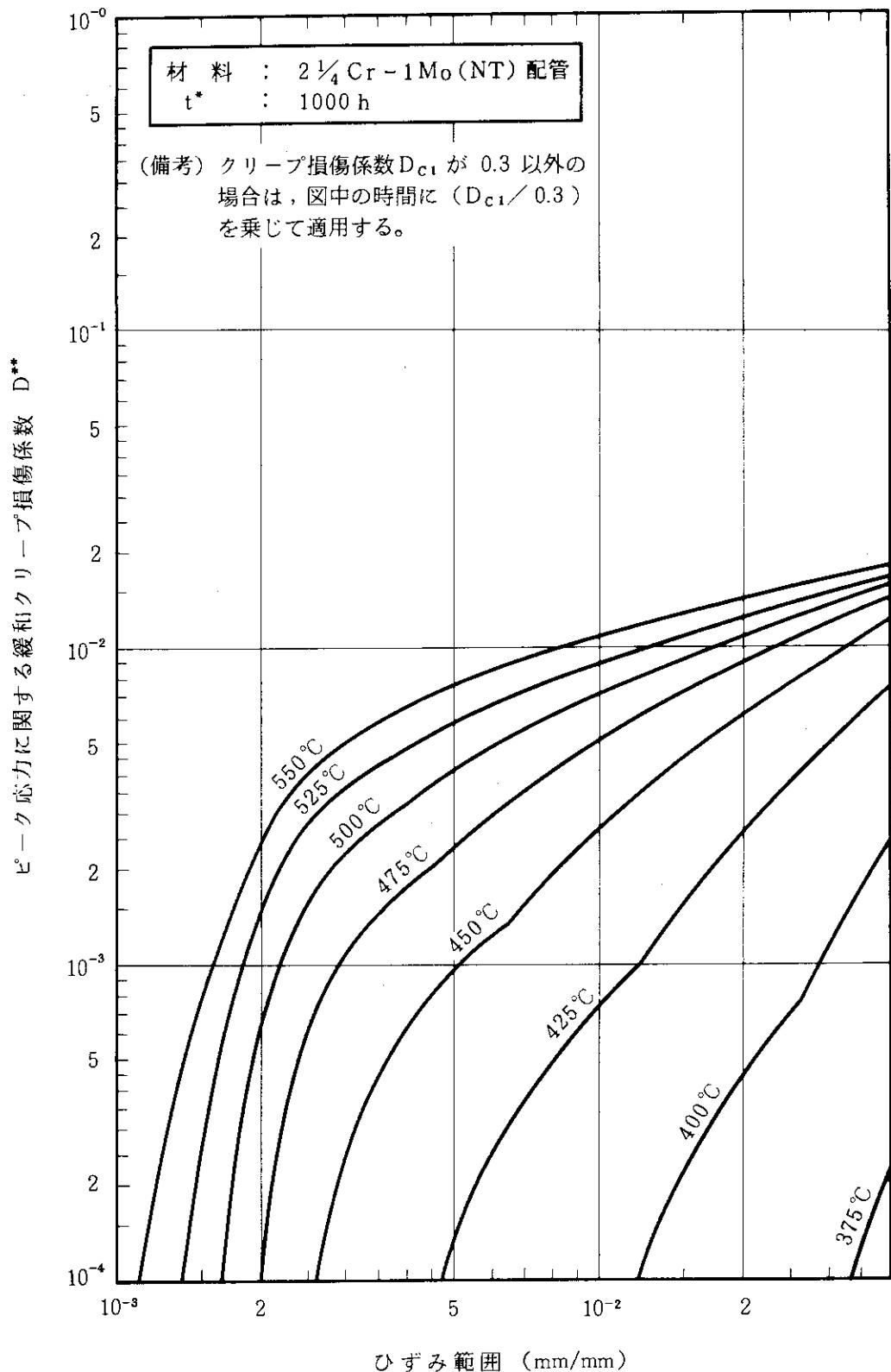
別図ME.1-(a)-(7) 2 1/4 Cr - 1 Mo (NT) 板のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

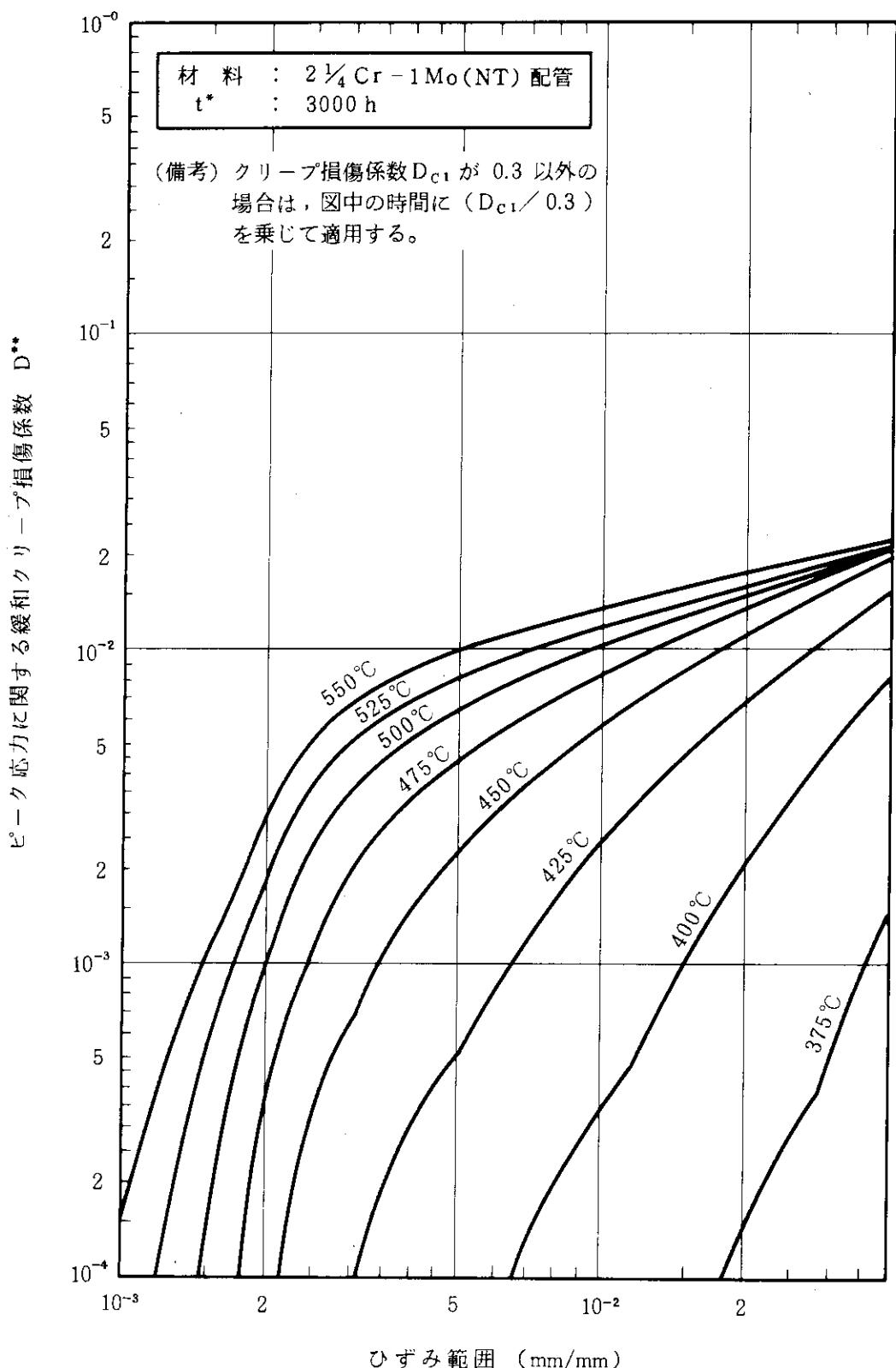
別図ME.1-(a)-(⑥) $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ (NT) 板のビーグ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

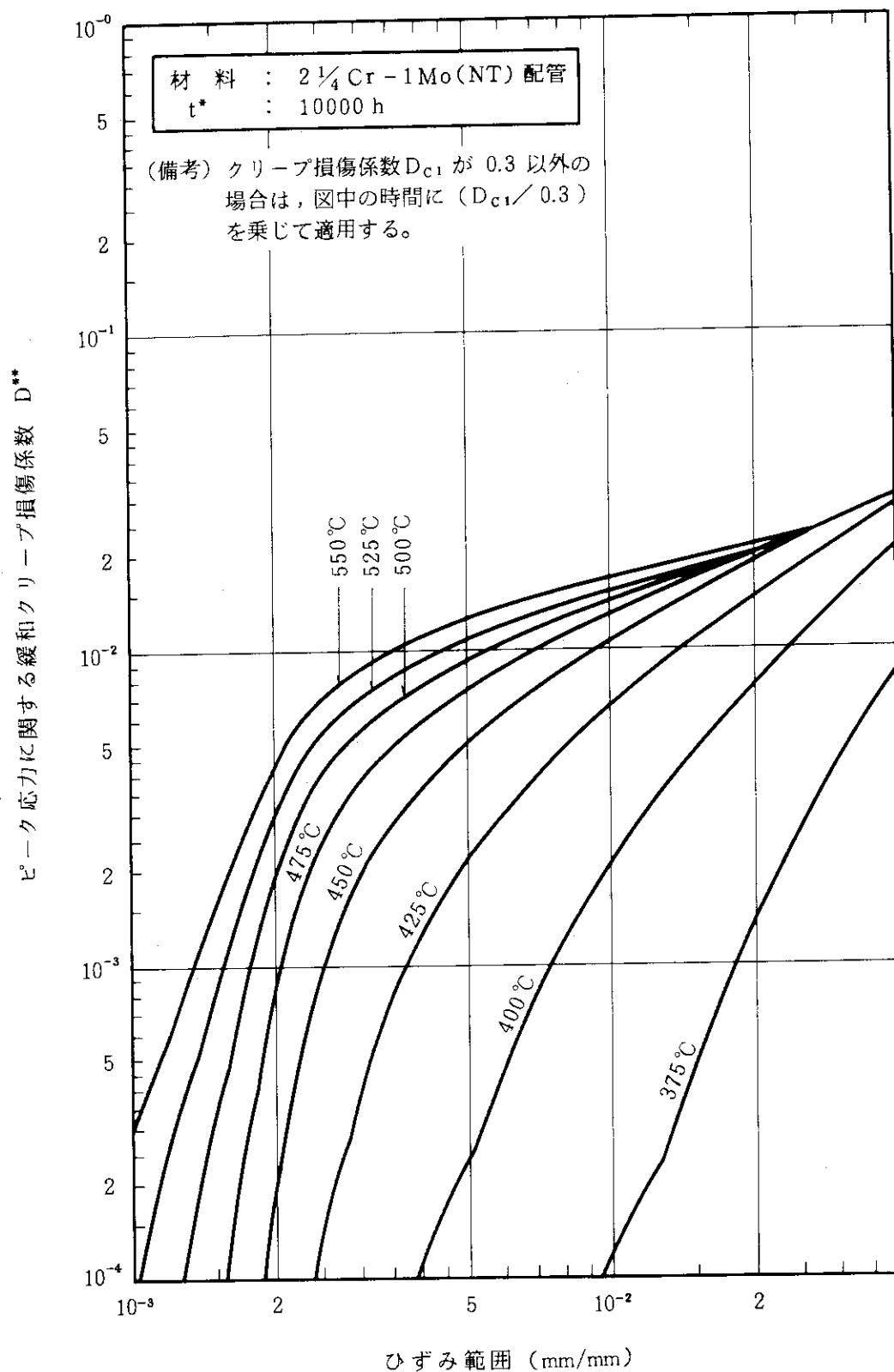
ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**} 別図ME.1-(a)-(9) $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}(\text{NT})$ 板のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

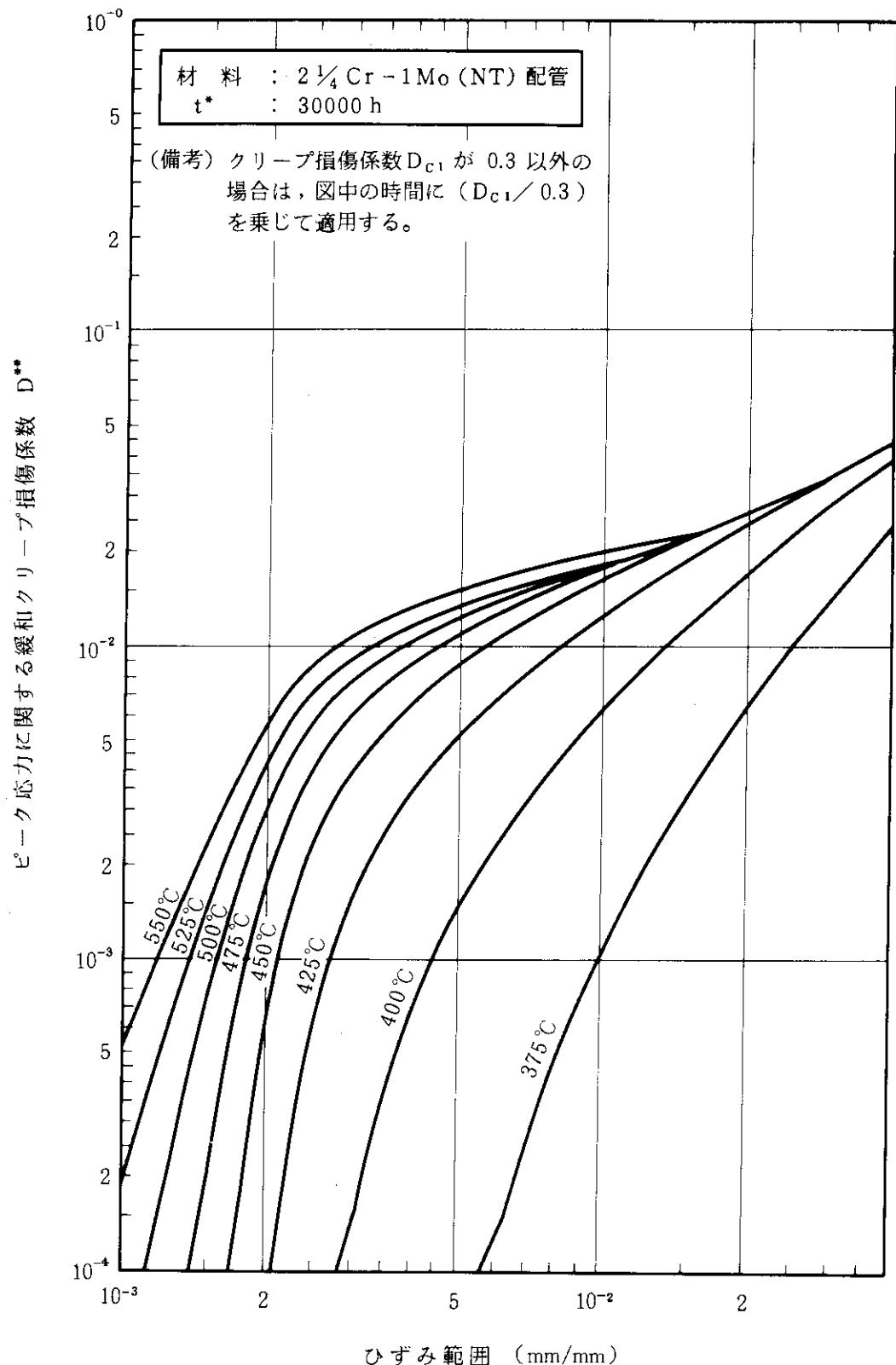
別図ME.1-(b)-① $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo(NT)}$ 配管のピーコク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

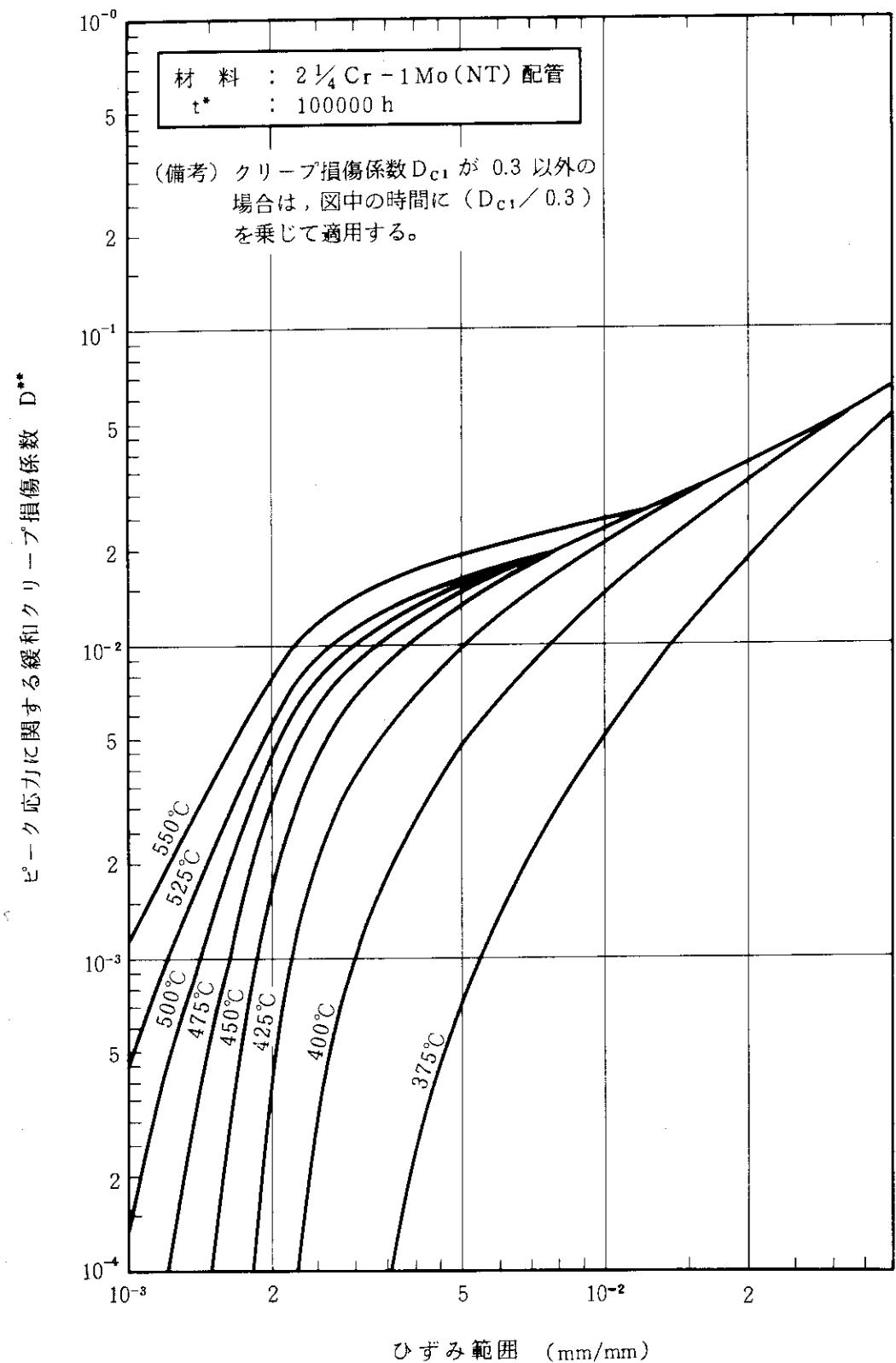
別図ME.1-(b)-② $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}(\text{NT})$ 配管のピーコク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

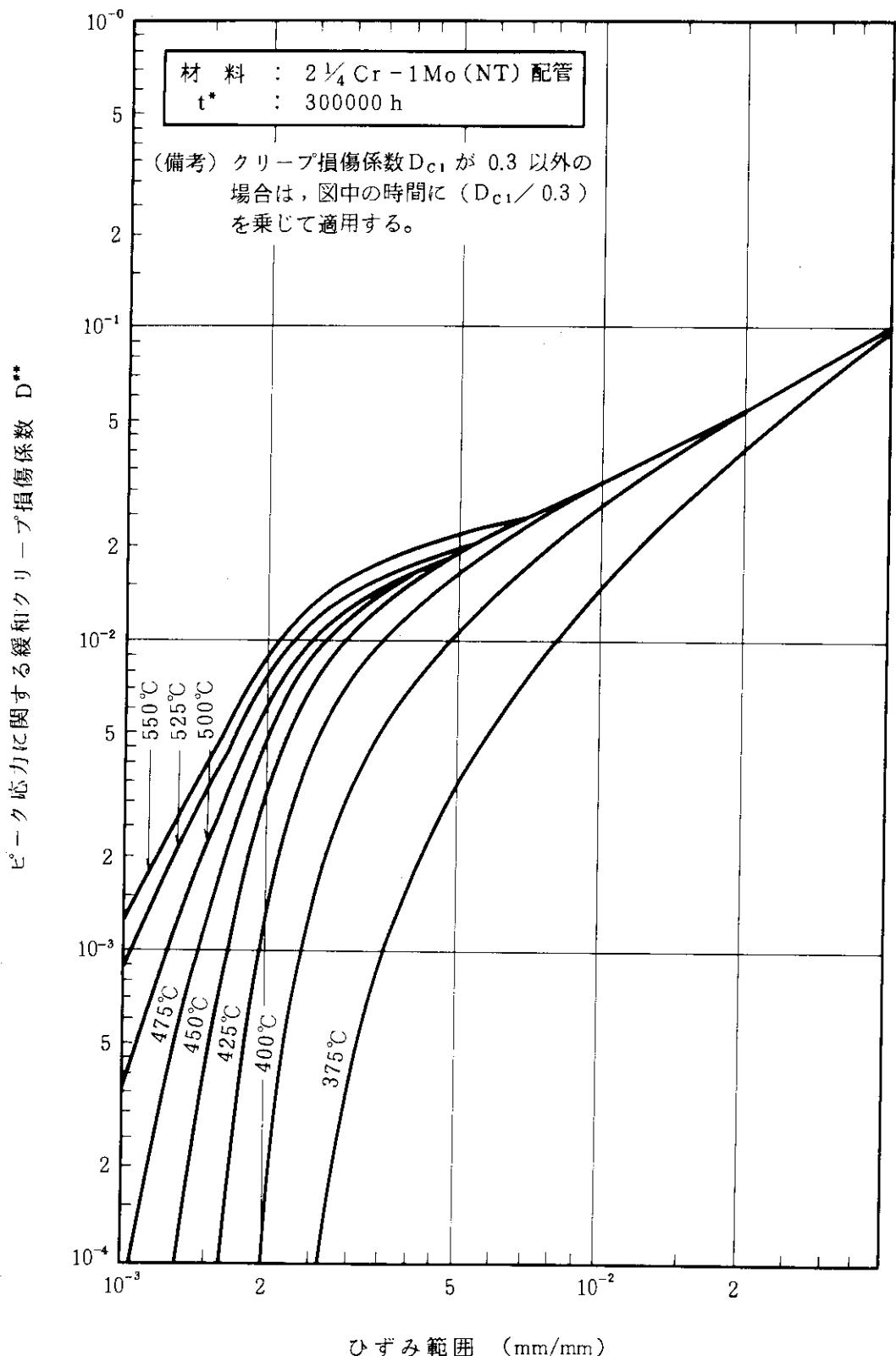
別図ME.1-(b)-③ $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo(NT)}$ 配管のピーケ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

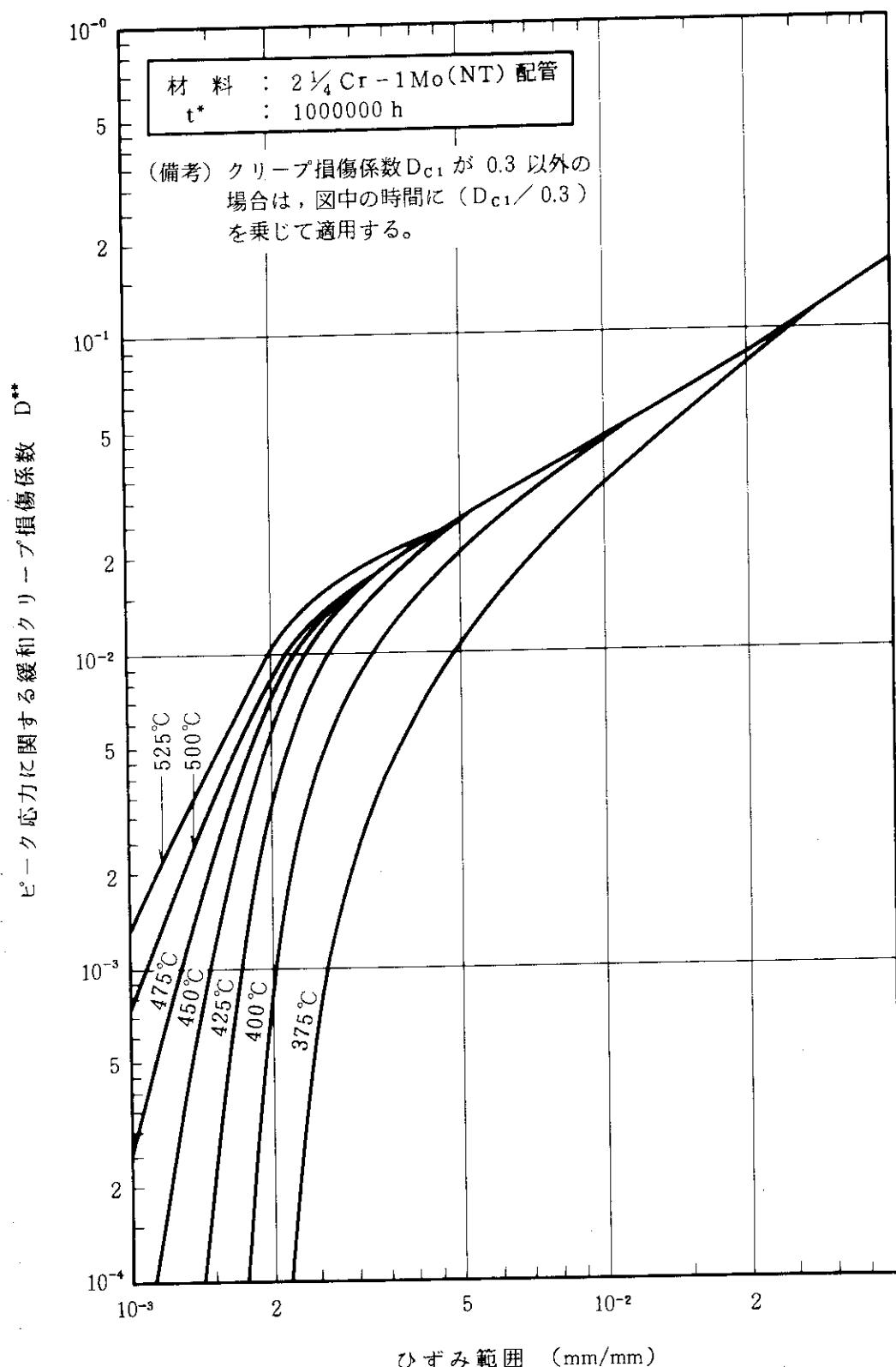
別図ME.1-(b)-④ $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}(\text{NT})$ 配管 のピーコク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

別図ME.1-(b)-⑤ $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ (NT)配管のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

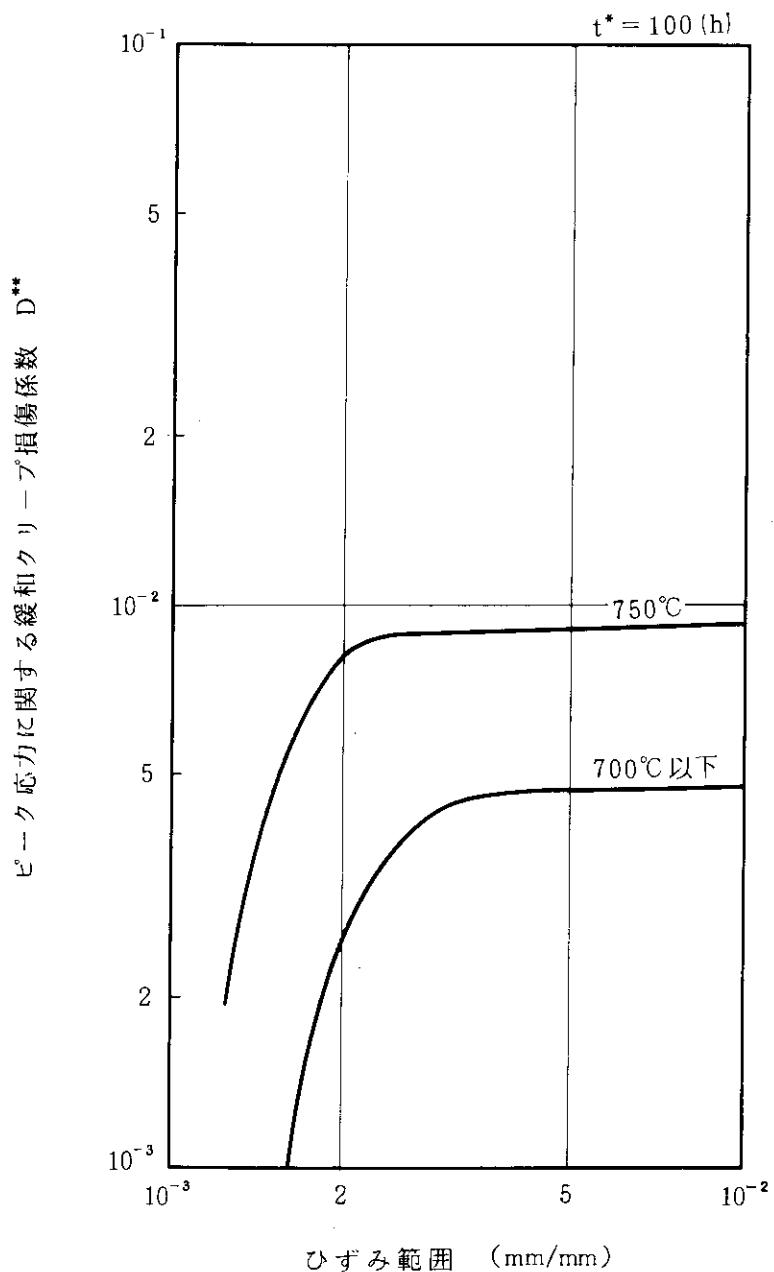
別図ME.1-(b)-(6) $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ (NT) 配管のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

別図ME.1-(b)-(7) 2 1/4 Cr-1 Mo(NT) 配管のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

別図ME.1-(b)-(8) 2 1/4 Cr-1 Mo (NT) 配管のビーグ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

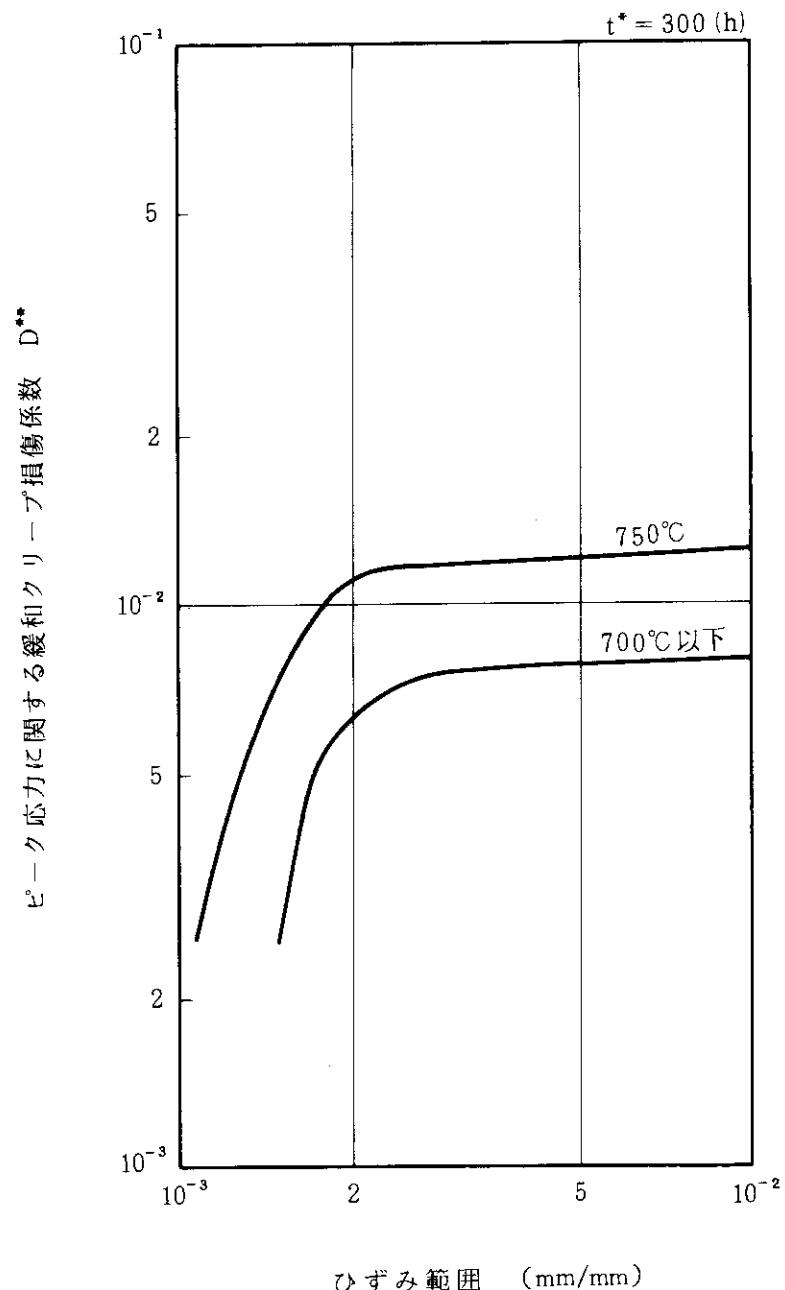
別図ME.1-(b)-⑨ 2 1/4 Cr-1 Mo(NT) 配管のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

(備考) クリープ損傷係数 D_{c1} が 0.3 以外の場合は、図中の時間に $(D_{c1}/0.3)$ を乗じて適用する。



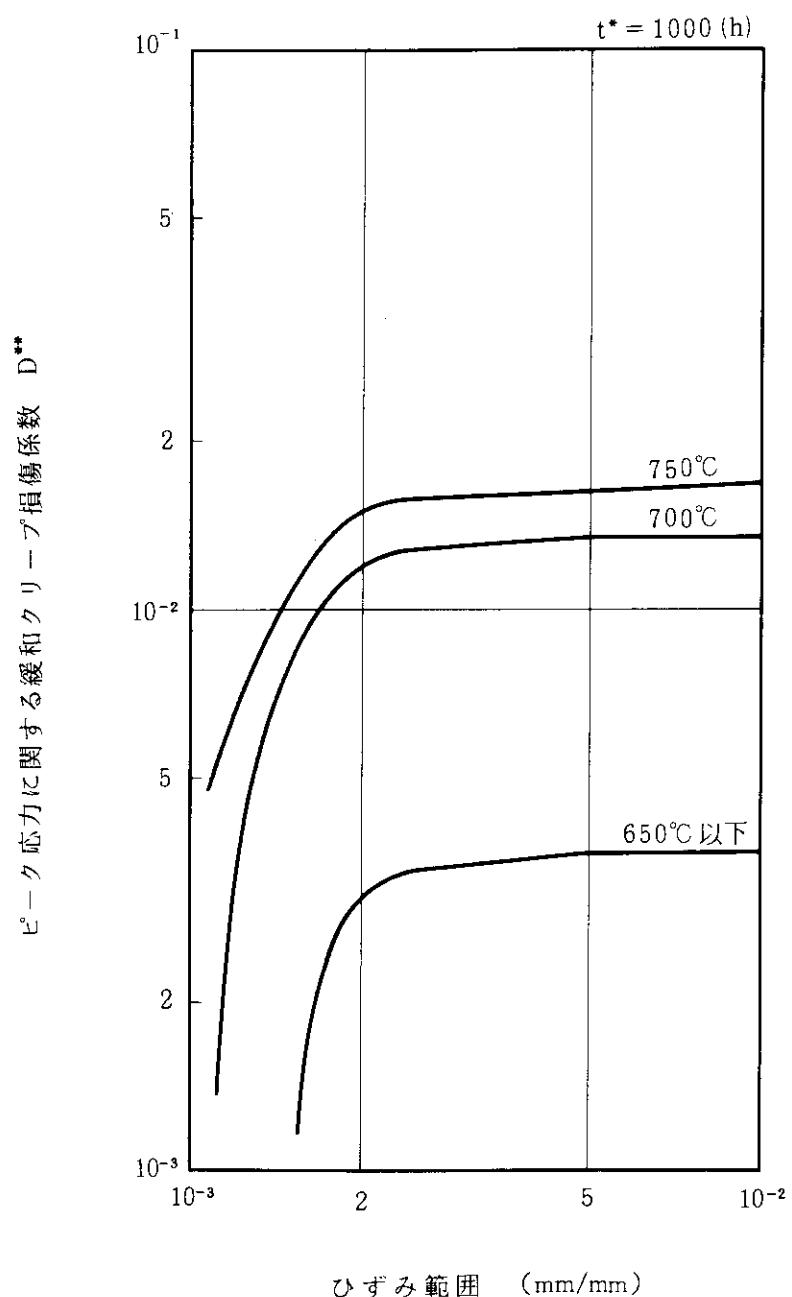
別図ME.1-(c)-① ハステロイXRのピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

(備考) クリープ損傷係数 D_{c1} が 0.3 以外の場合は、図中の時間に $(D_{c1}/0.3)$ を乗じて適用する。



別図ME.1-(c)-② ハステロイXRのピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

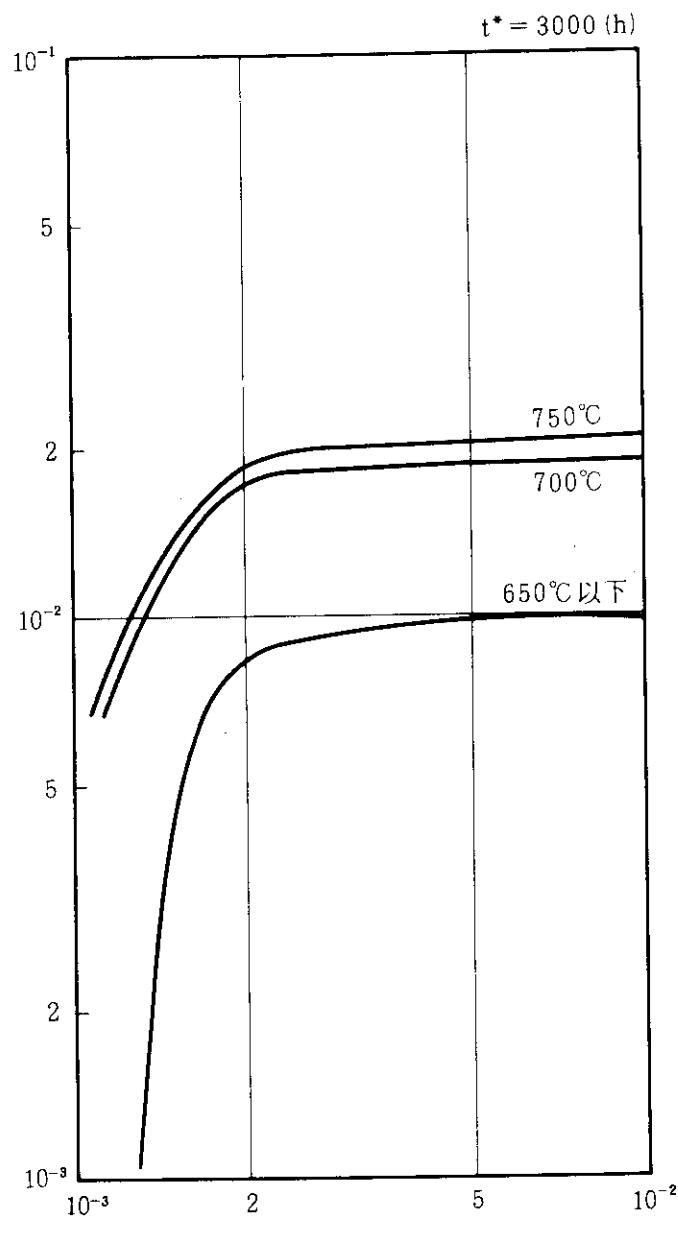
(備考) クリープ損傷係数 D_{c1} が 0.3 以外の場合は、図中の時間に $(D_{c1}/0.3)$ を乗じて適用する。



別図ME.1-(c)-③ ハステロイX R のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

(備考) クリープ損傷係数 D_{c1} が 0.3 以外の場合は、図中の時間に $(D_{c1}/0.3)$ を乗じて適用する。

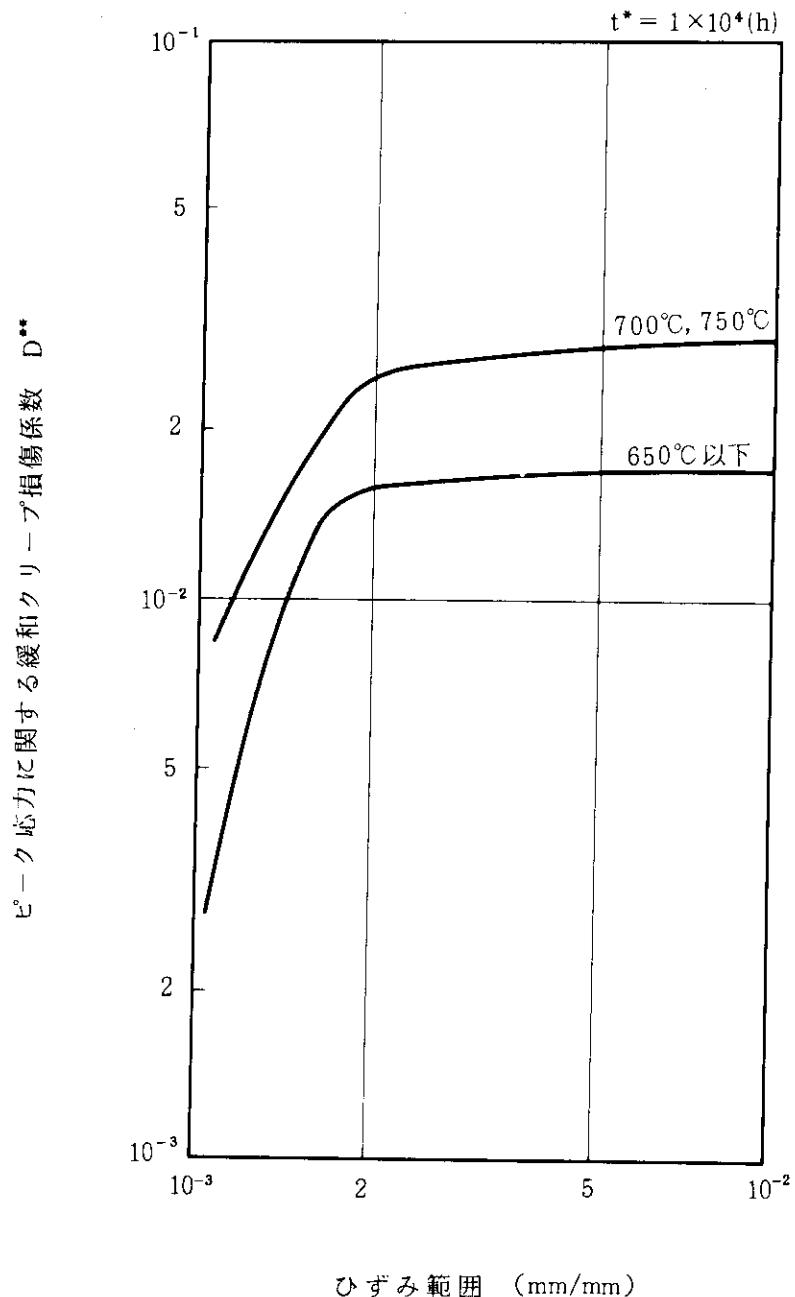
ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}



ひずみ範囲 (mm/mm)

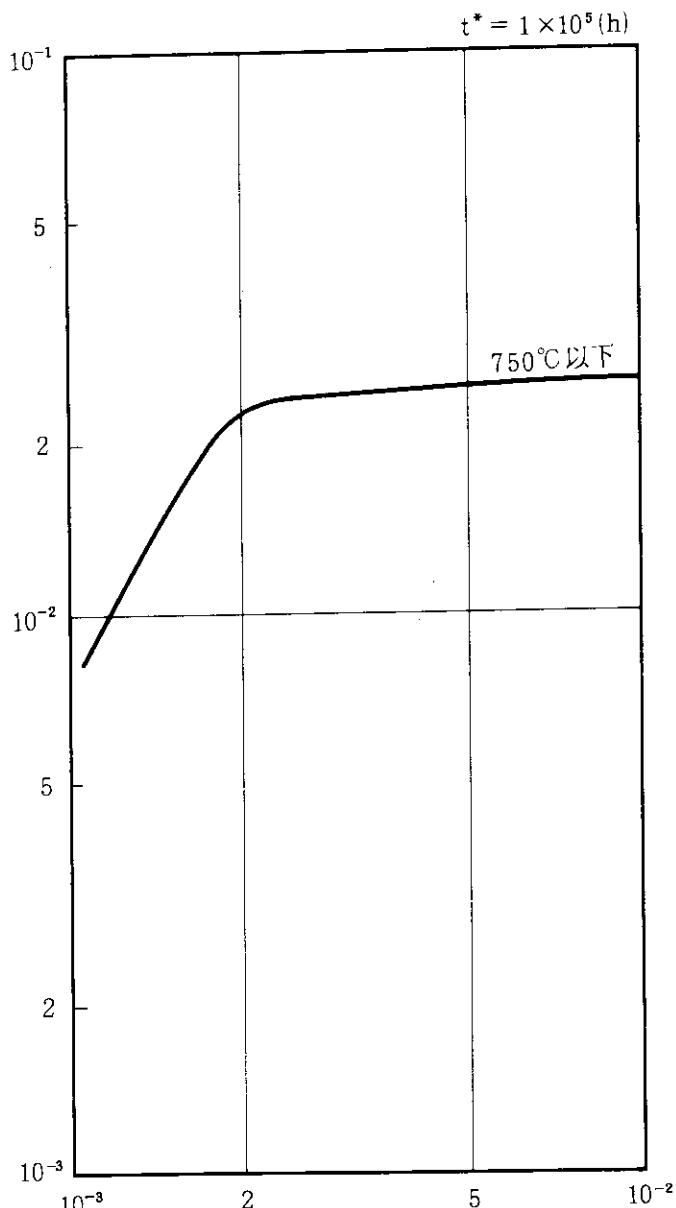
別図ME.1-(c)-④ ハステロイXRのピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

(備考) クリープ損傷係数 D_{c1} が 0.3 以外の場合は、図中の時間に $(D_{c1}/0.3)$ を乗じて適用する。



別図ME.1-(c)-⑤ ハステロイXRのピーカ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

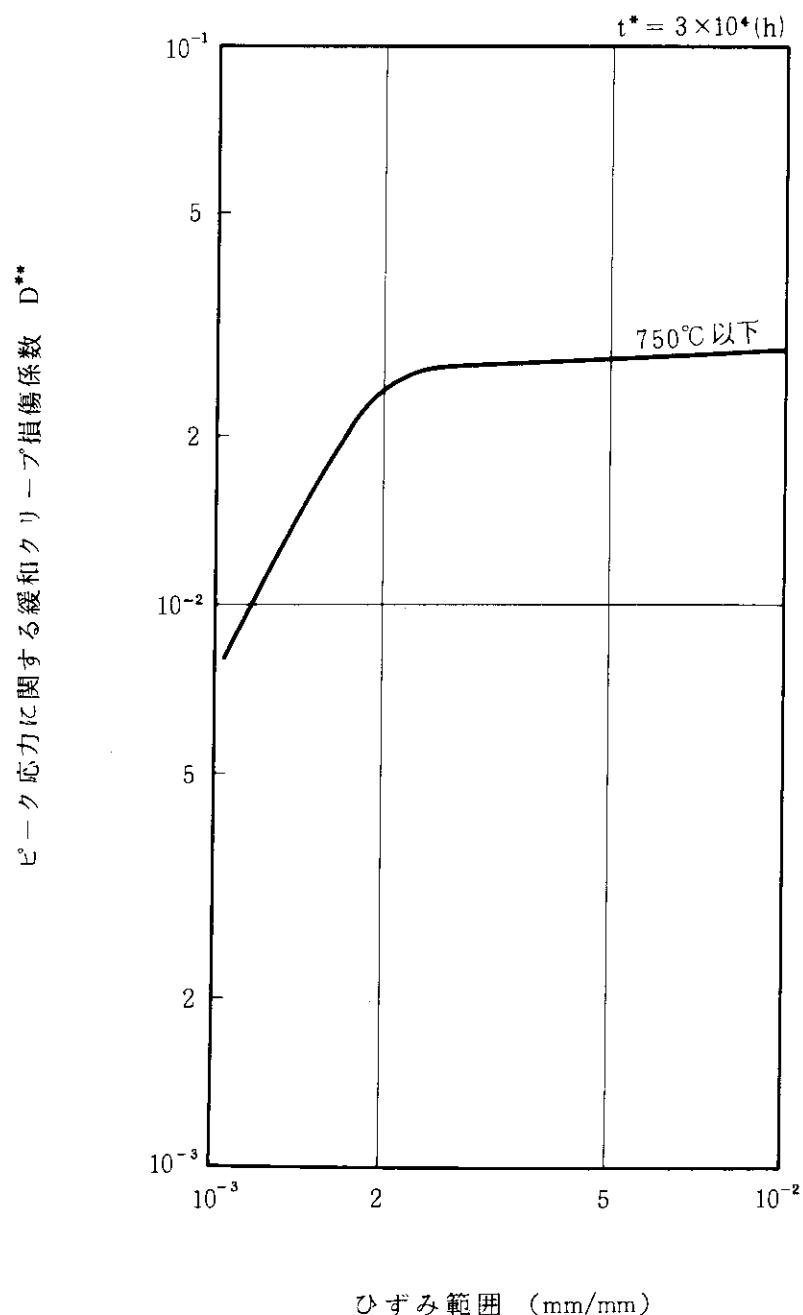
(備考) クリープ損傷係数 D_{c1} が 0.3 以外の場合は、図中の時間に $(D_{c1}/0.3)$ を乗じて適用する。

ピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**} 

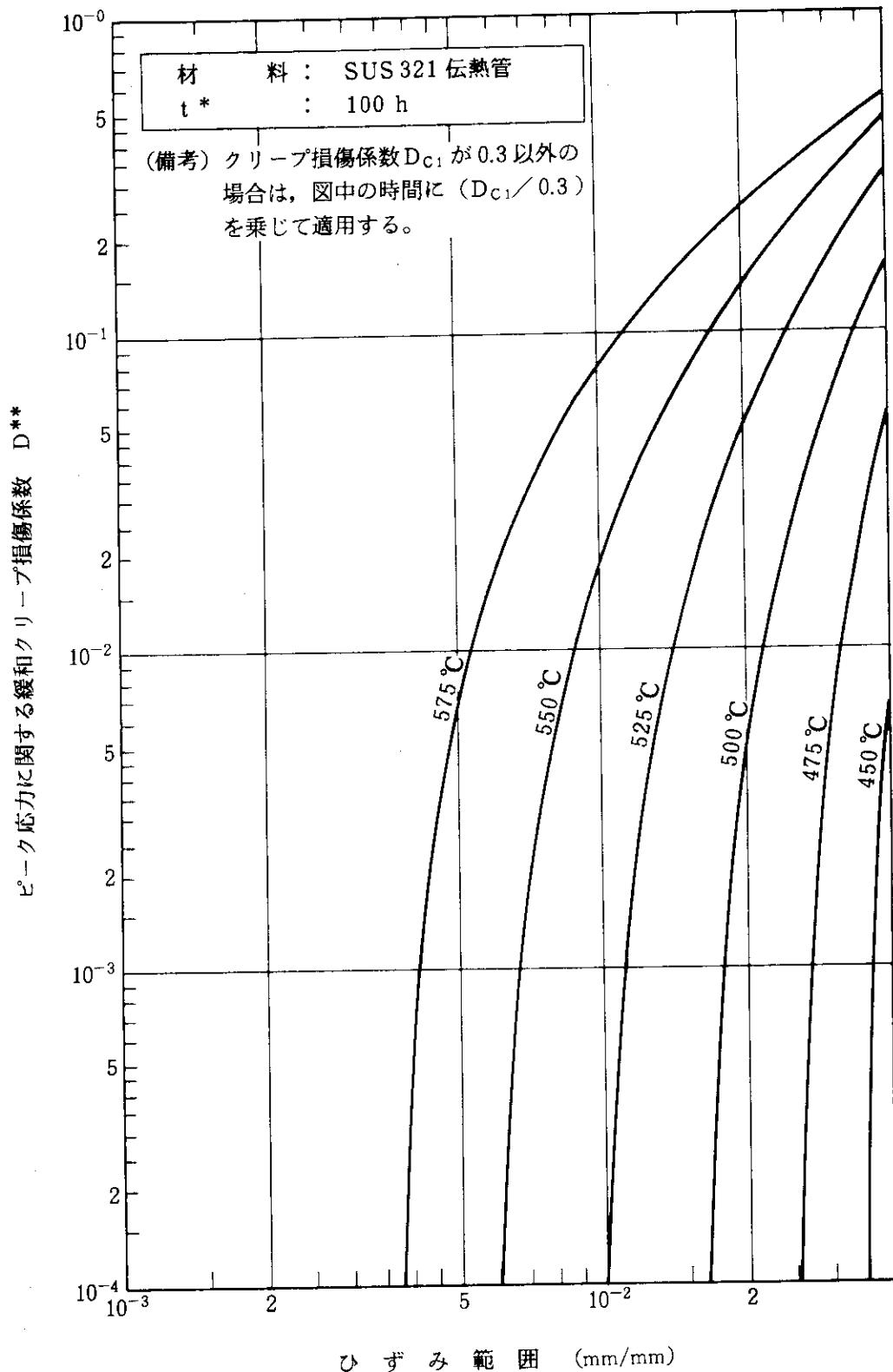
ひずみ範囲 (mm/mm)

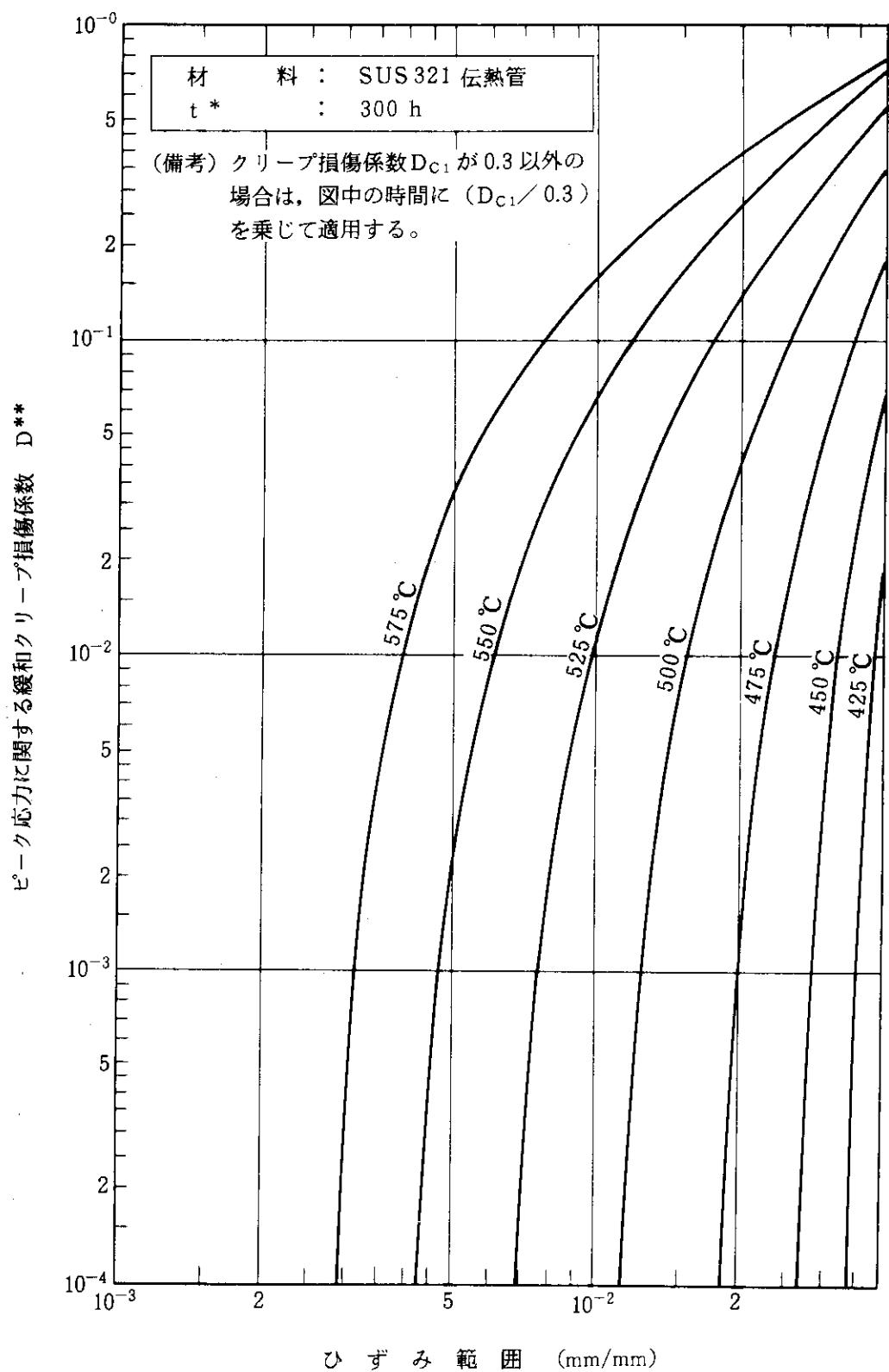
別図ME.1-(c)-⑥ ハステロイX R のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

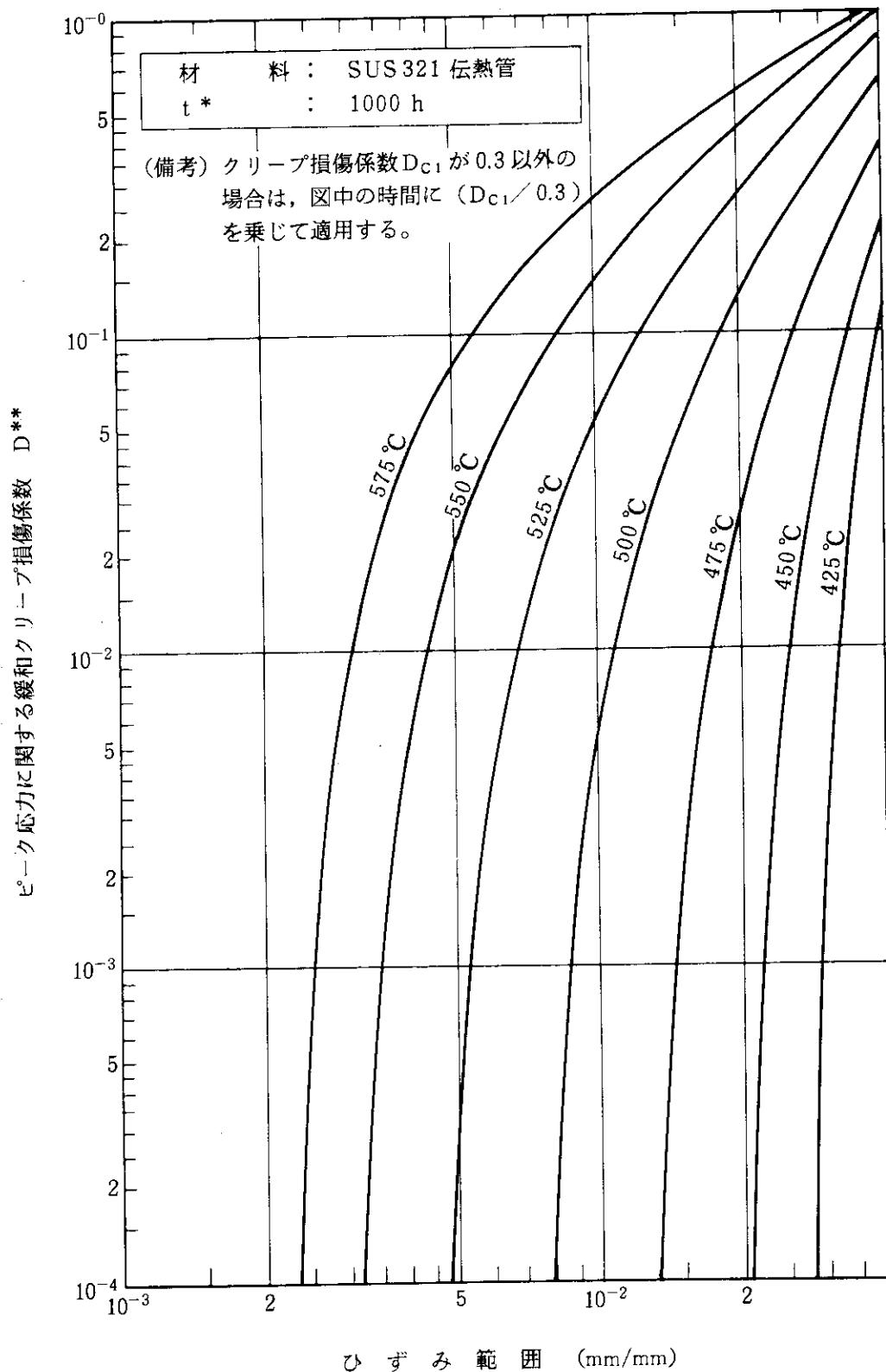
(備考) クリープ損傷係数 D_{c1} が 0.3 以外の場合は、図中の時間に $(D_{c1}/0.3)$ を乗じて適用する。

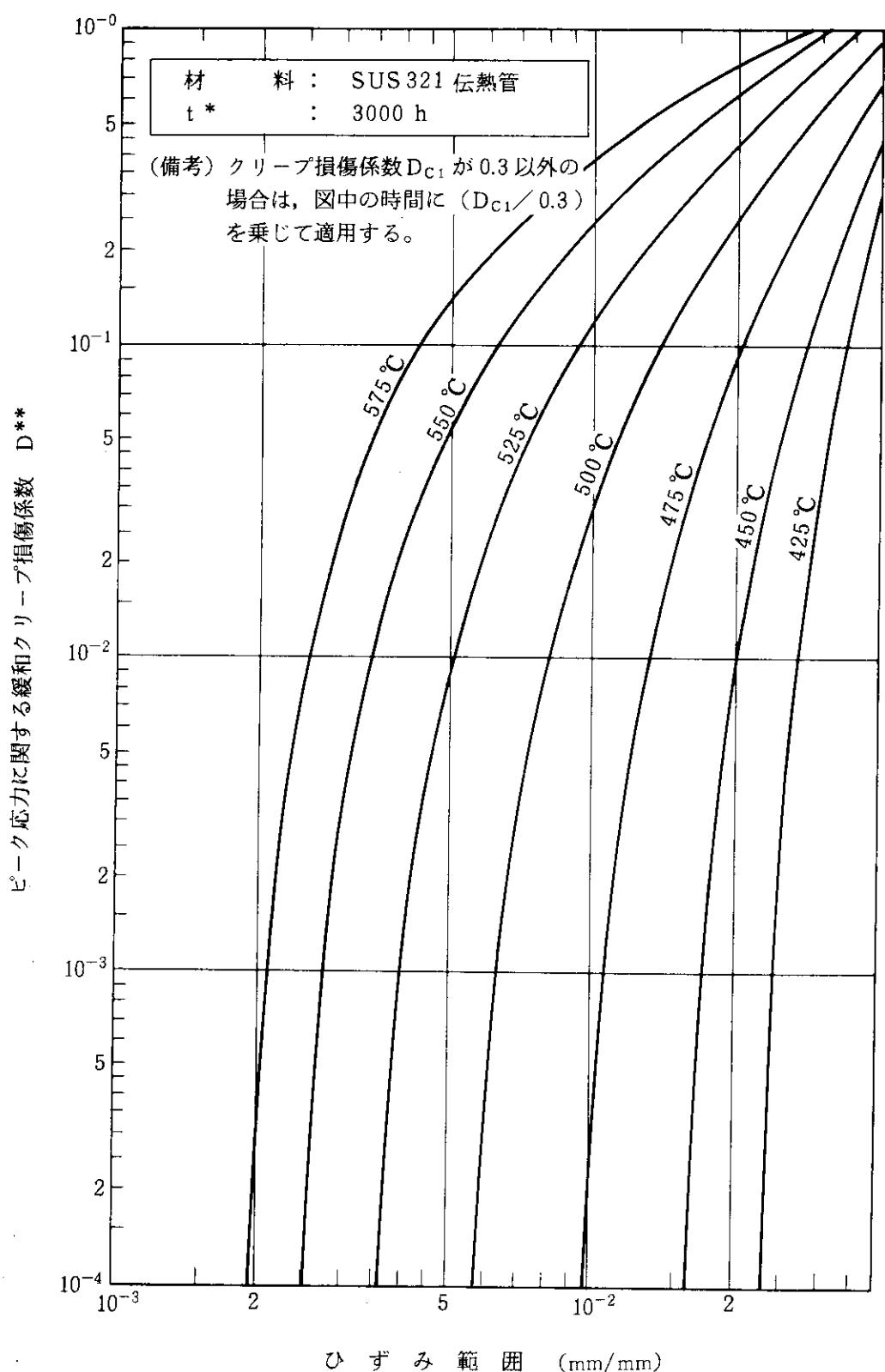


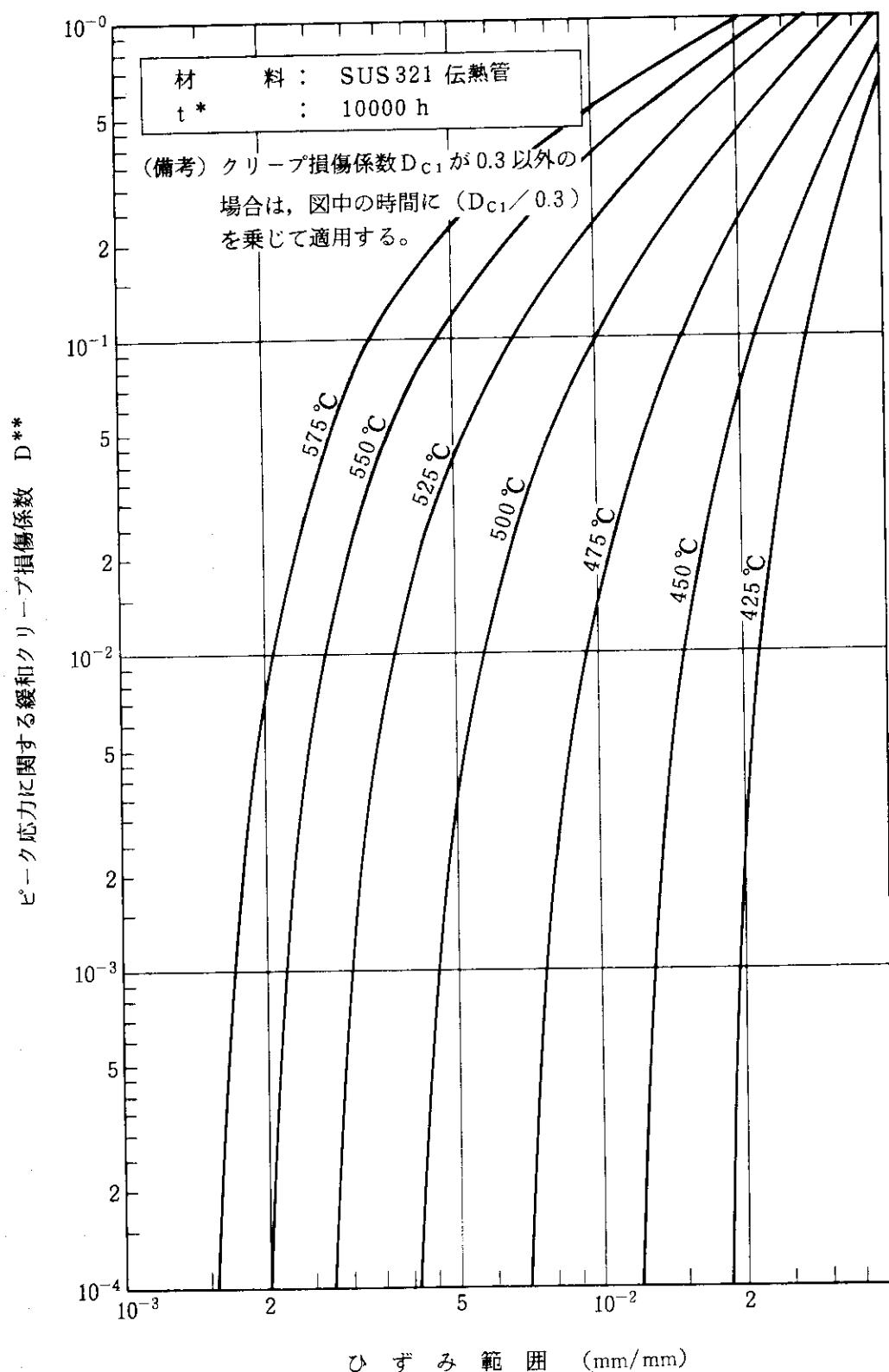
別図ME.1-(c)-⑦ ハステロイXRのピーグ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

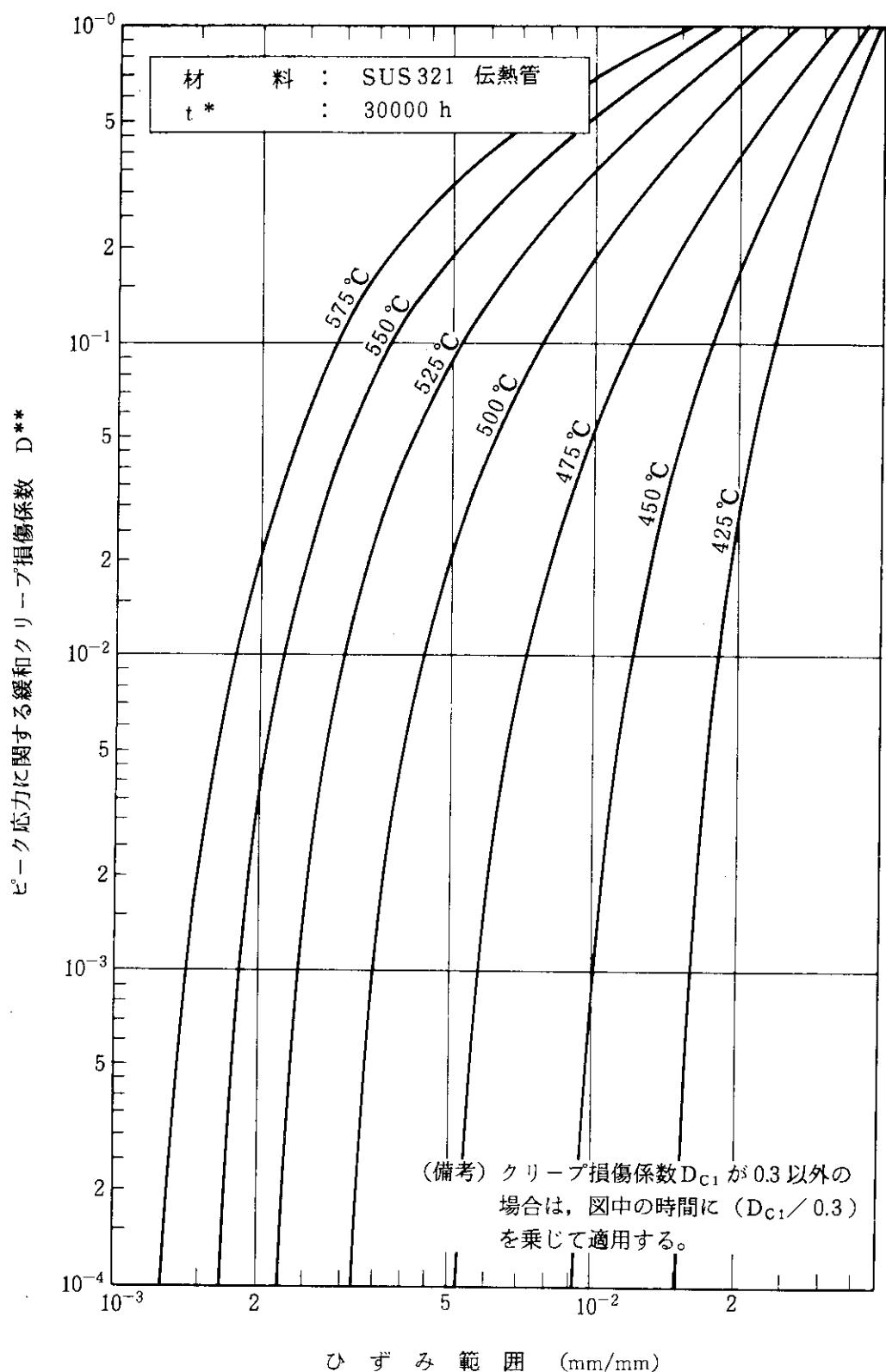
別図ME.1-(d)-① SUS 321 伝熱管 のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

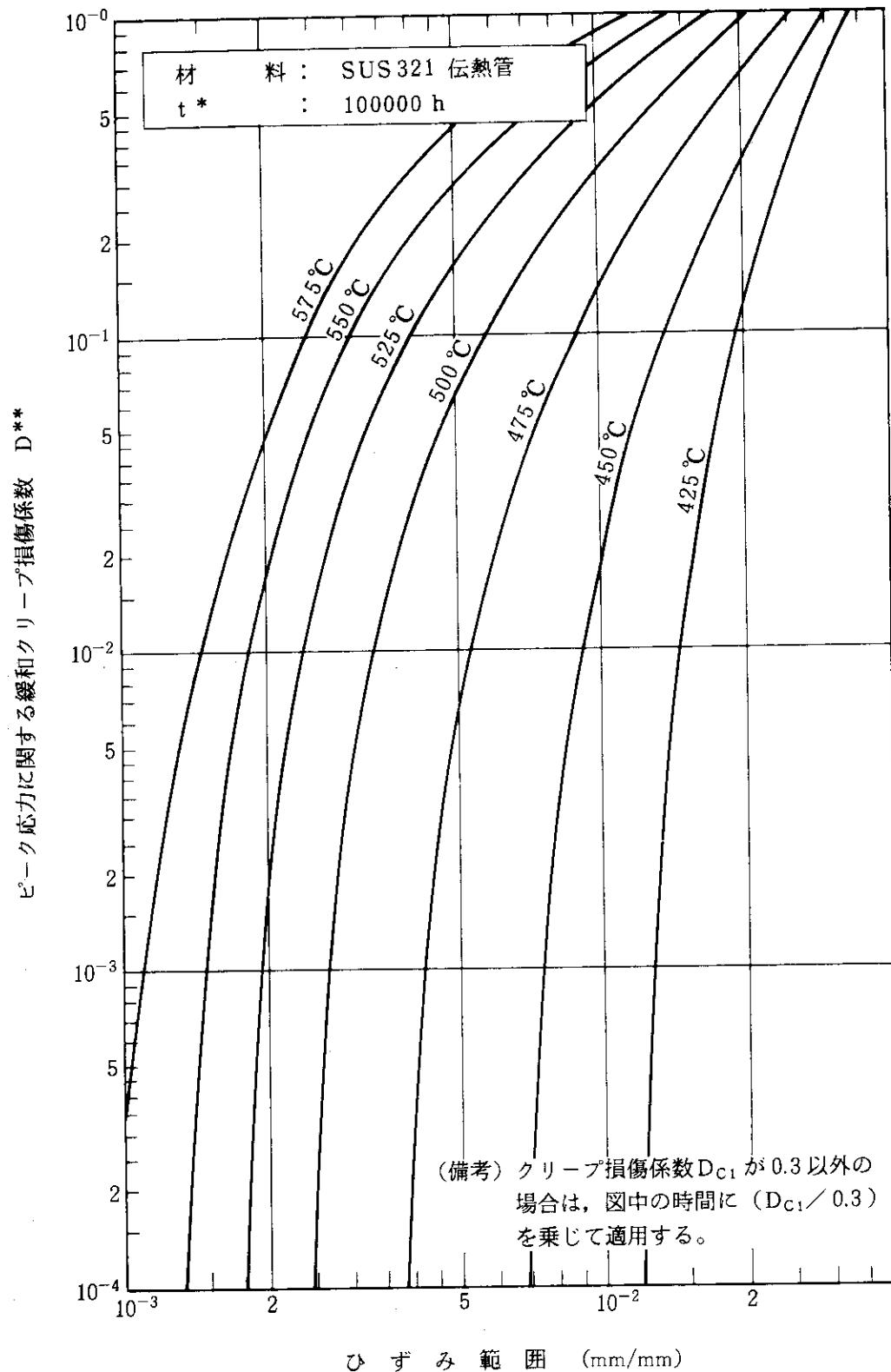
別図ME.1-(d)-② SUS 321 伝熱管のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

別図ME.1-(d)-③ SUS 321 伝熱管のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

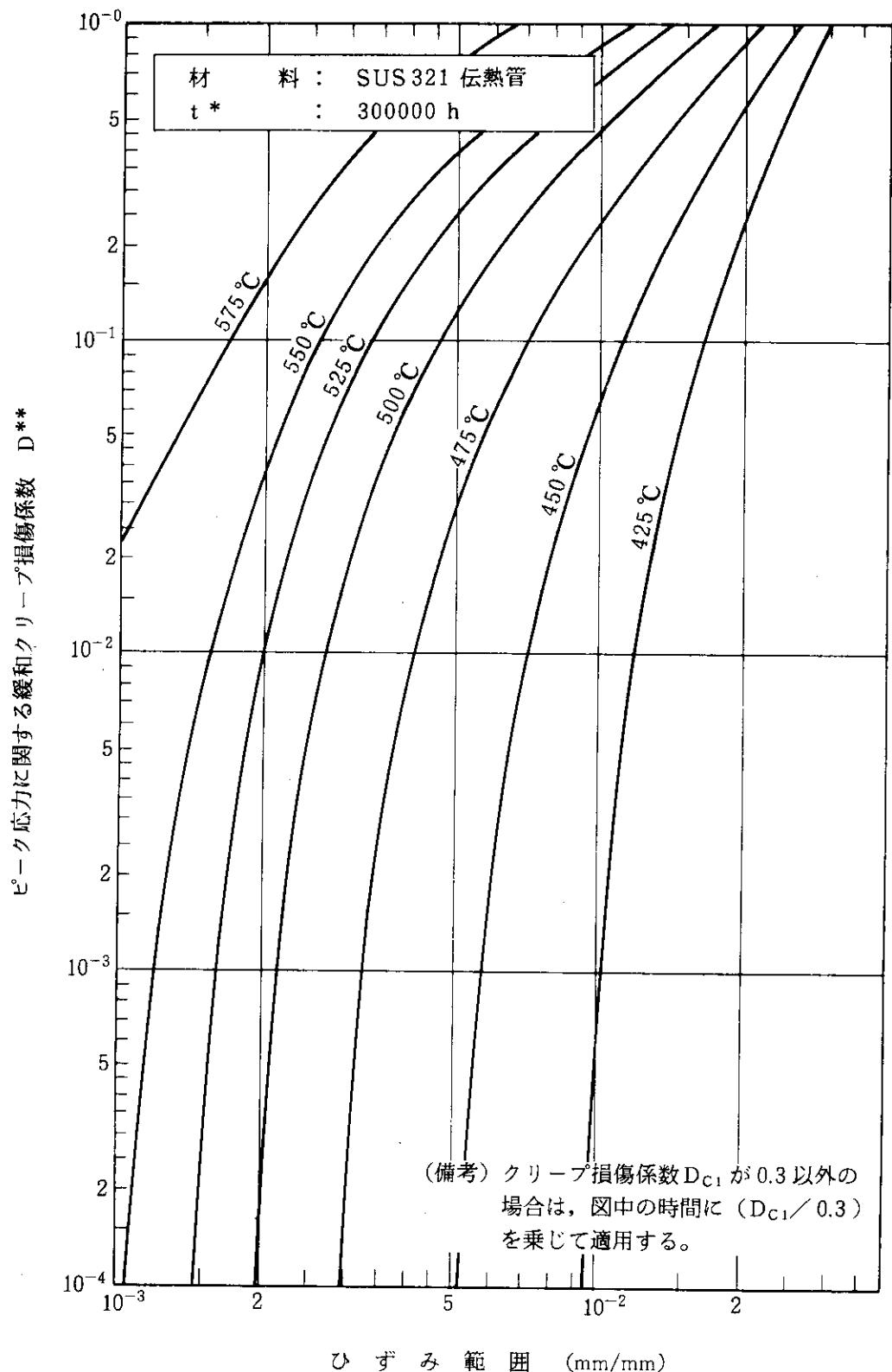
別図ME.1-(d)-④ SUS 321 伝熱管のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

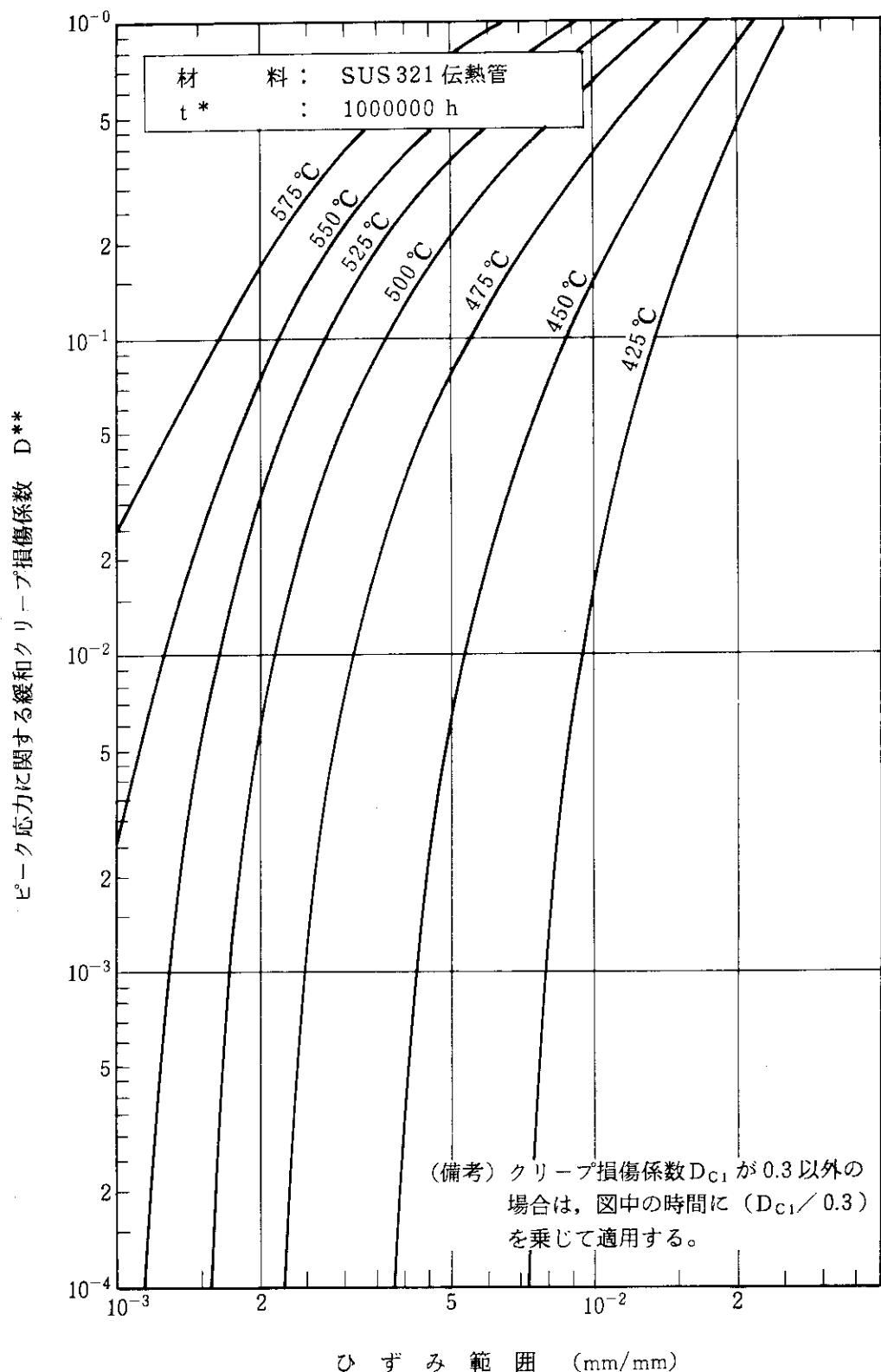
別図ME.1-(d)-⑤ SUS 321 伝熱管のビーグ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

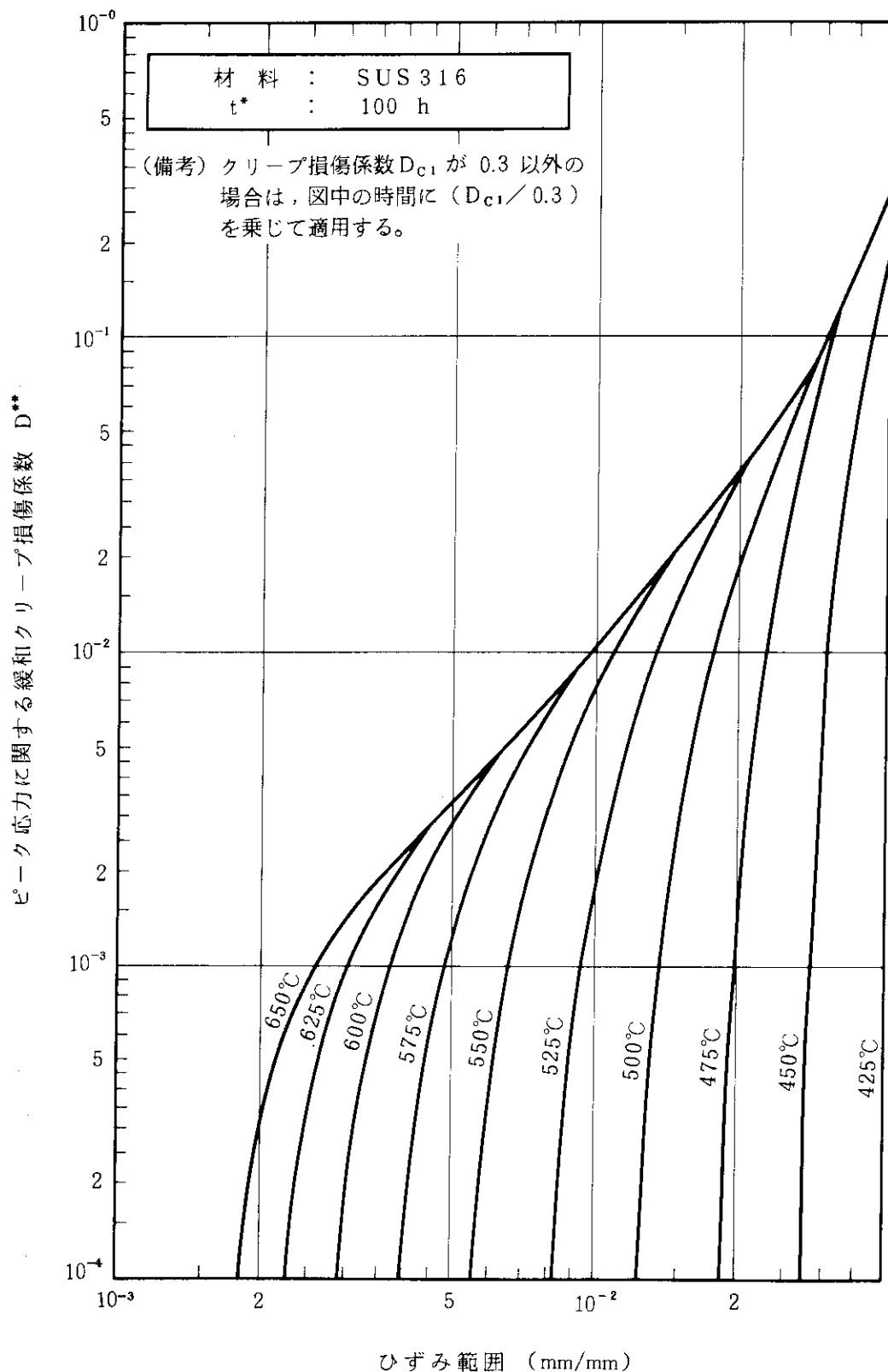
別図ME.1-(d)-⑥ SUS 321 伝熱管のピーコ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

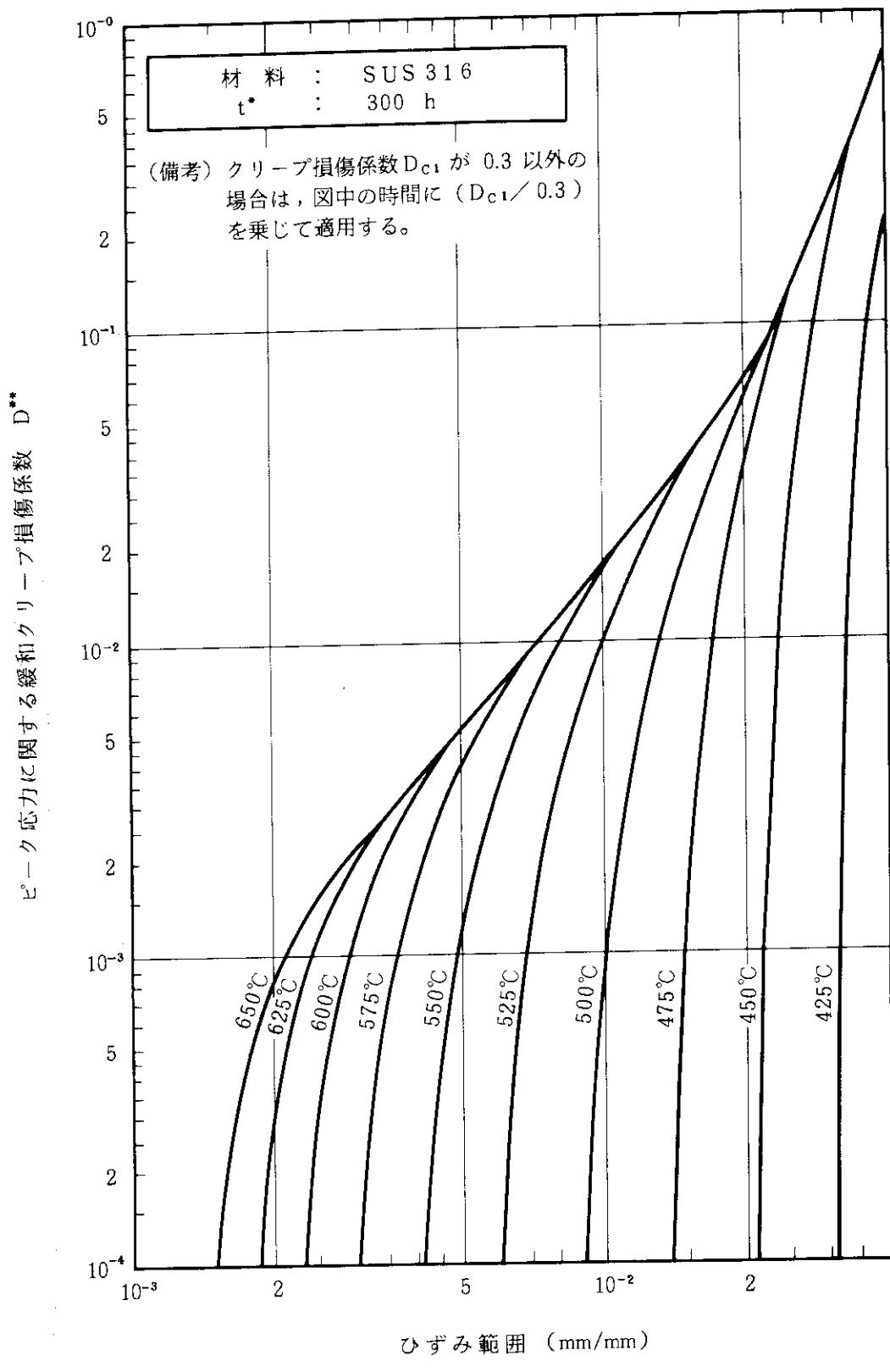


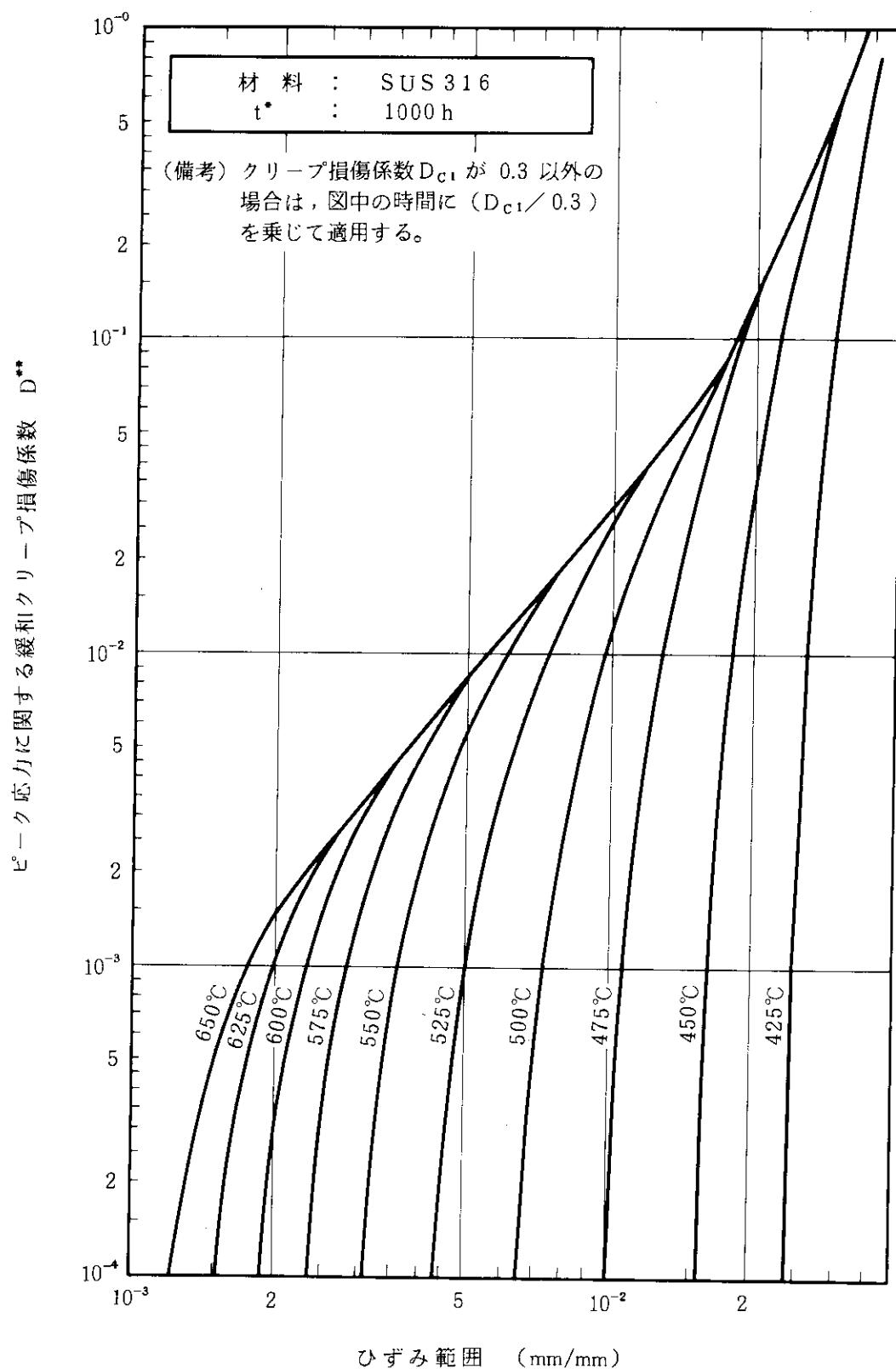
別図ME.1-(d)-(7) SUS 321 伝熱管のピーカ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

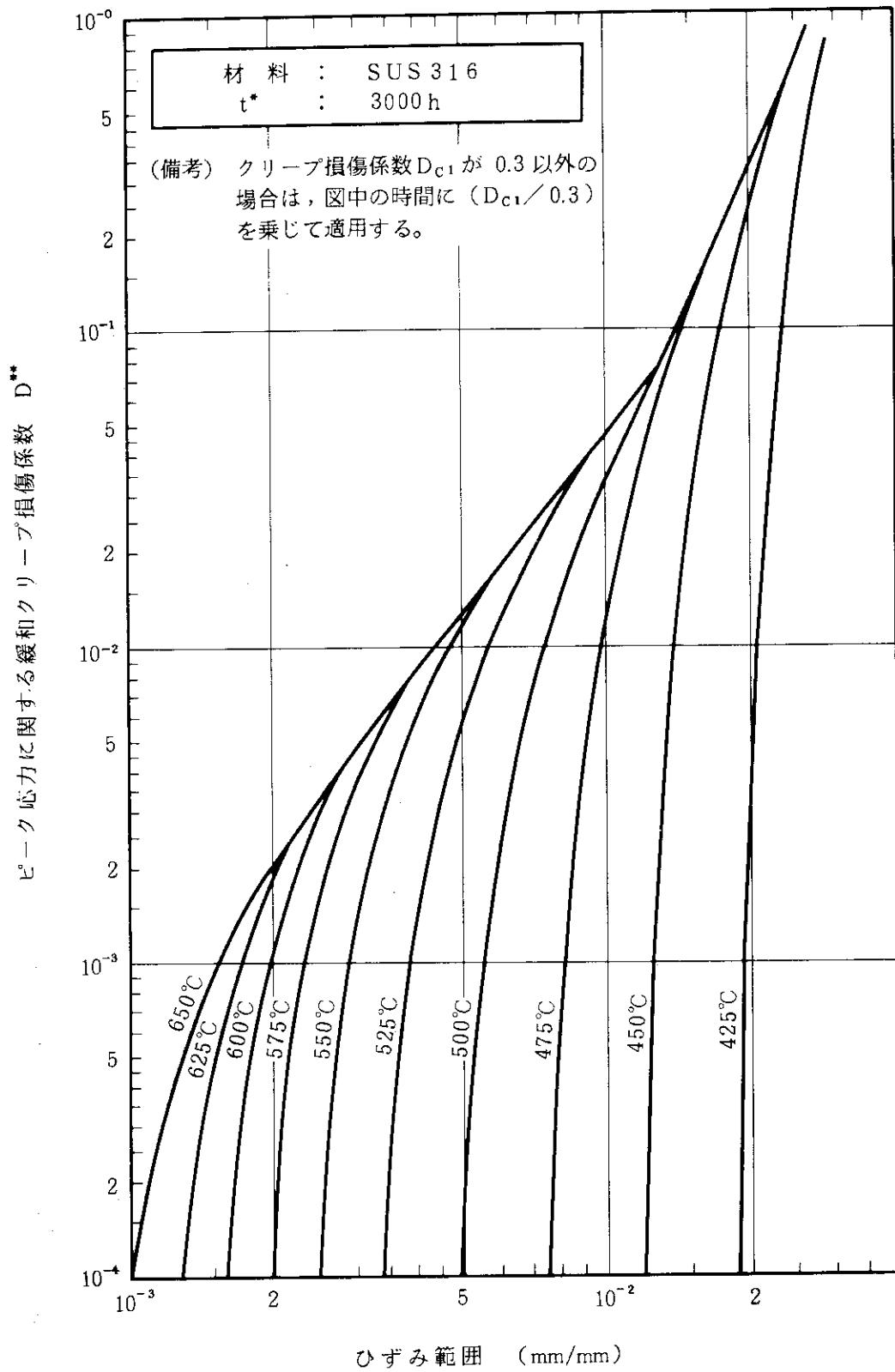
別図ME.1-(d)-⑧ SUS 321 伝熱管のピーコ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

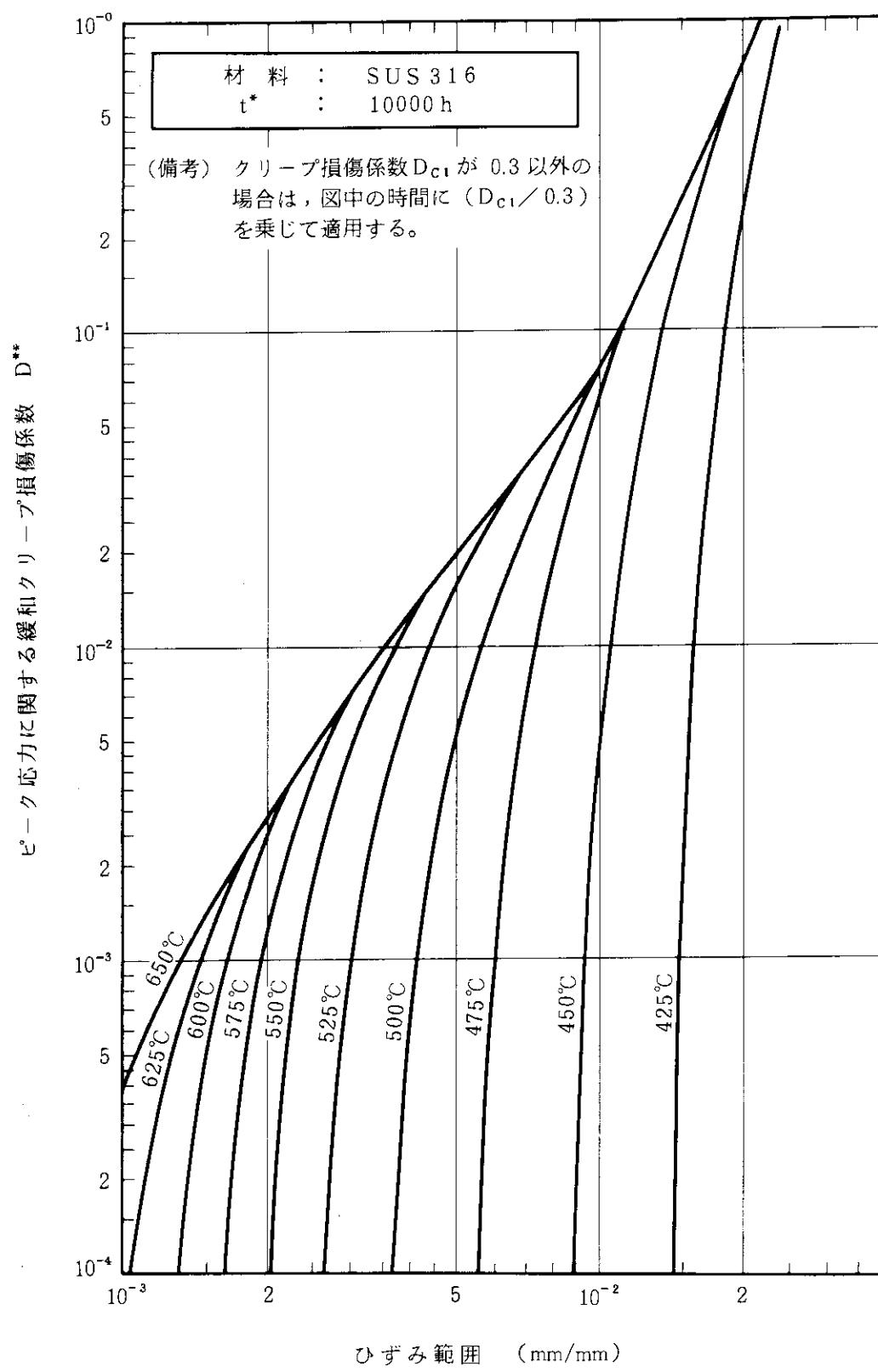
別図ME.1-(d)-⑨ SUS 321 伝熱管のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

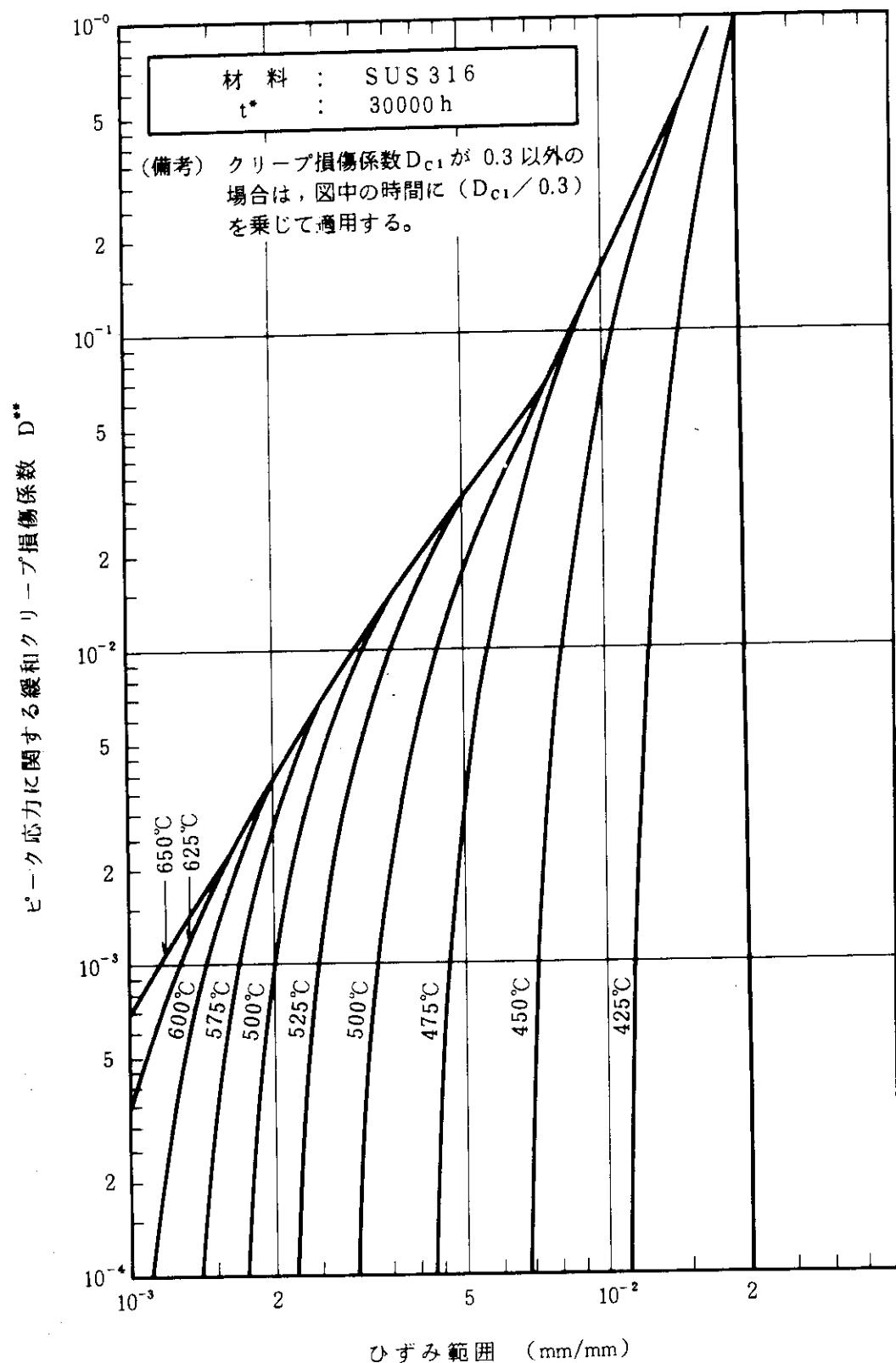
別図ME.1-(e)-① SUS 316 のピーカ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

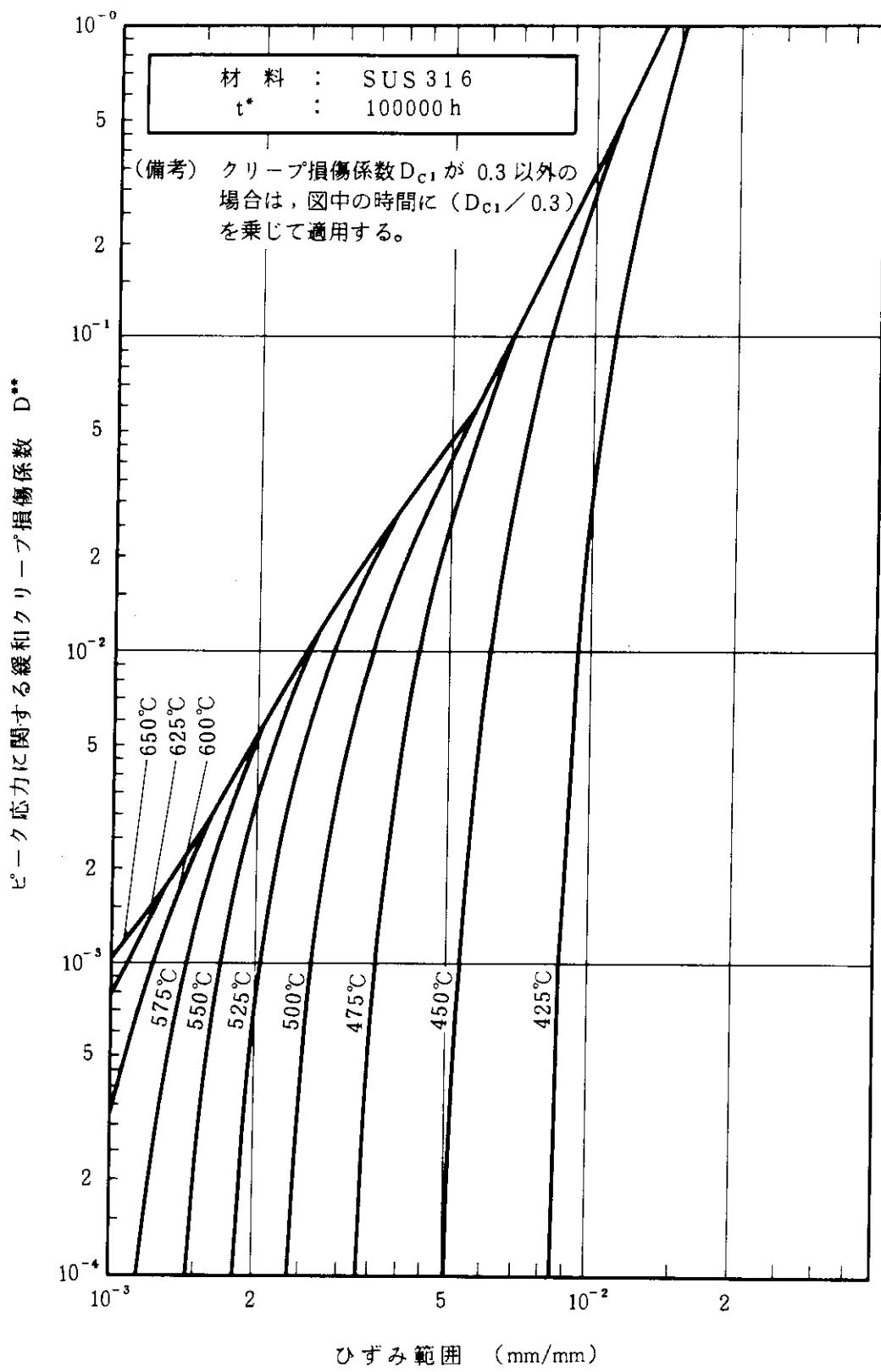
別図ME.1-(e)-② SUS 316 のピーケ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

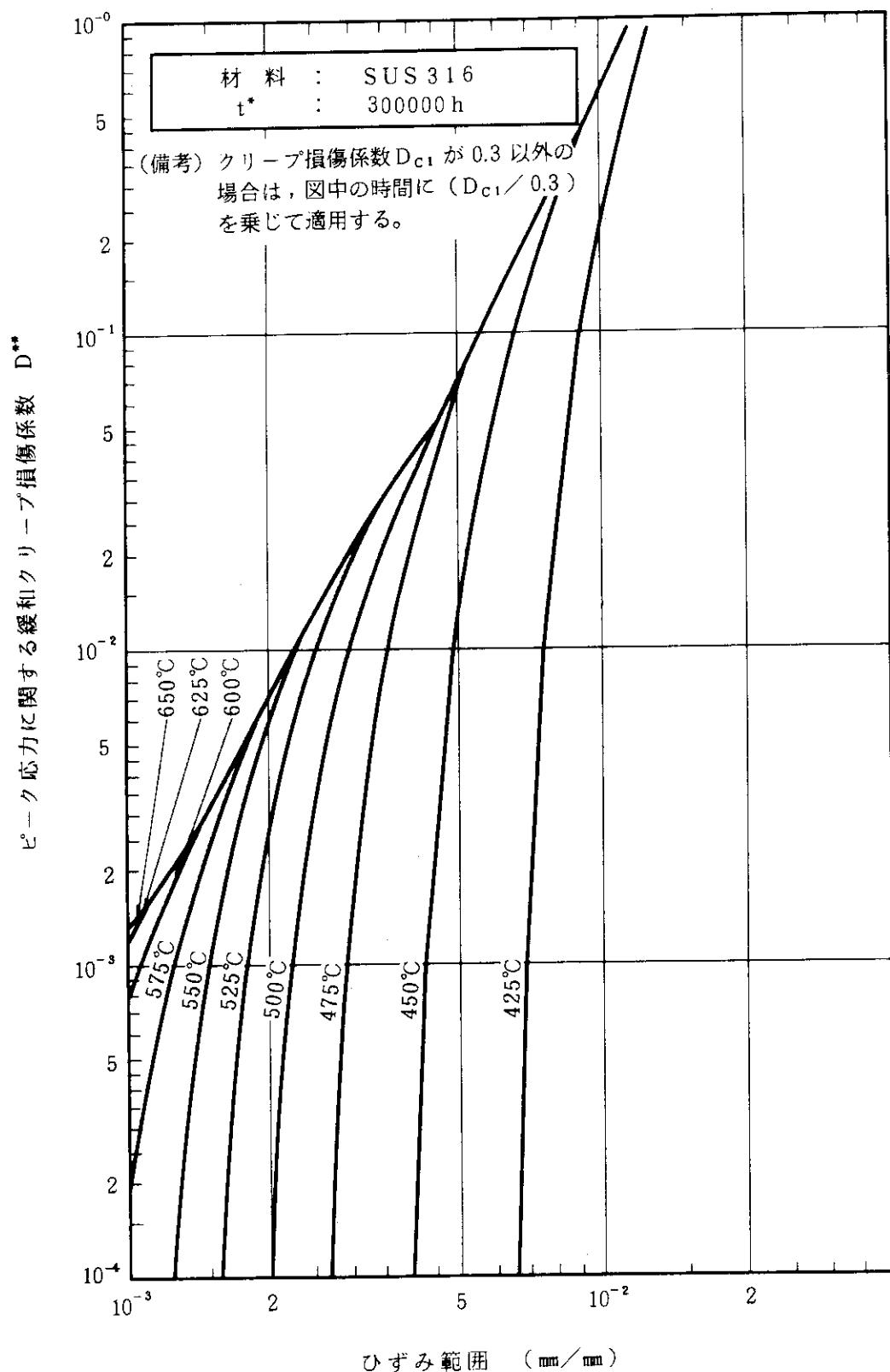
別図ME.1-(e)-③ SUS 316 のピーコク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

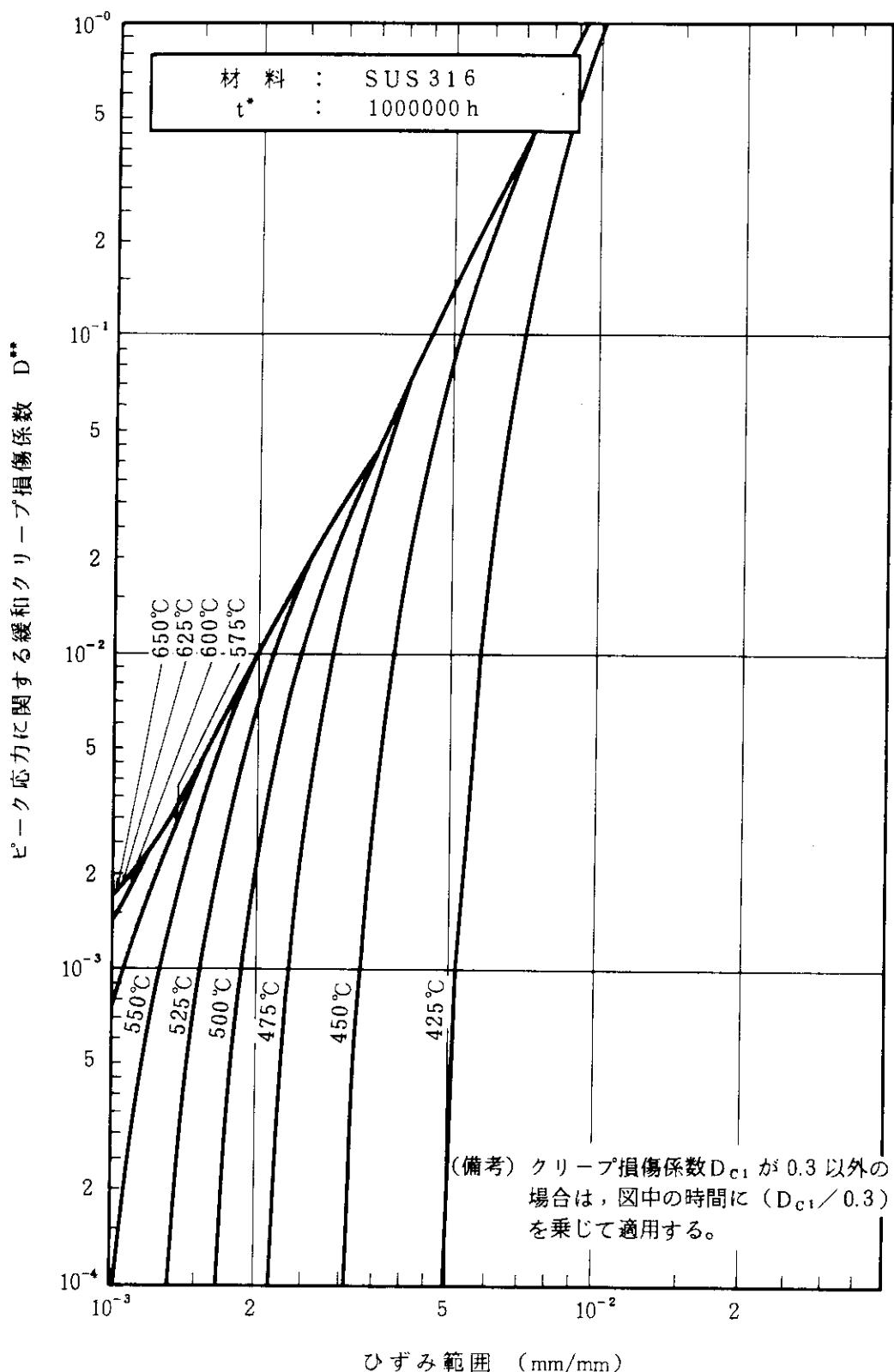
別図ME.1-(e)-④ SUS 316 のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

別図ME.1-(e)-⑤ SUS 316 のピーコ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

別図ME.1-(e)-⑥ SUS 316 のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

別図ME.1-(e)-⑦ SUS 316 のピーケ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

別図ME.1-(e)-⑧ SUS 316 のピーク応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}

別図ME.1-(e)-⑨ SUS 316 のピーコ応力に関する緩和クリープ損傷係数 D^{**}