

SUS304, SUS321および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の高温
および超高温引張試験

区 分 変 更	
変更後資料番号	PNC TN941 85-128
決裁年月日	平成 10 年 9 月 28 日

1985年9月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は動燃事業団の開発業務を進めるため限られた関係者だけに配布するものです。
したがってその取扱いには充分注意を払って下さい。なお この資料の供覧、複製、転載
引用等には事業団の承認が必要です。

SUS304, SUS321および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の高温 および超高温引張試験

土田 豊, 加藤 章一
平野 正敦, 二瓶 勲

要 旨

SUS304 鋼板材, SUS 321 伝熱管相当板材および鍛造材, および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼板材につき高温引張試験を行ない「もんじゅ」材料強度基準の短時間引張特性につきその妥当性を確認すると共に, SUS 304 鋼板材およびSUS 321 鋼伝熱管相当板材, 鍛造材につき, ナトリウム-水反応時を想定した高ひずみ速度での超高温引張試験特性(900°Cまで)を評価した。主要結果は次の通りである。

(1) 高温域(650°C以下)での引張特性

- (i) SUS 304 鋼および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の板材では, 0.2%耐力および引張強さが「もんじゅ」設計降伏強さ S_y および S_u を下廻ることはなかった。
- (ii) 各鋼種の破断伸びおよび紋りは既存データと一致し, 十分高い値を有していた。
- (iii) 各鋼種の弾塑性パラメータは BDS式とほぼ同等な値を示し, BDS式の妥当性が確認された。

(2) 超高温域(650~900°C)での引張特性

- (i) SUS 304 および 321 鋼伝熱管相当板材, SUS 321 鋼鍛造材につき, 1 および 10%/min のひずみ速度で 900°Cまでの超高温引張試験を行ない, 引張強さ, 0.2%耐力, 破断および紋りのデータを取得した。
- (ii) 各鋼種の破断伸びおよび紋りは優れた値を示し, またひずみ速度が大きい程高い延性を持つ傾向を示した。
- (iii) 引張強さに対する引張ひずみ速度の影響を定量的に評価する試みを行ない, これを用いて SUS 304 鋼および SUS 321 鋼の JIS に準拠したひずみ速度での引張強さの推定(900°Cまで)を試みた。

* 機器構造開発部材料開発室

High and ultra-high temperature tensile tests on SUS304,
on SUS304, SUS321 and 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steels

Yutaka Tsuchida, Shoichi Kato,
Masaatsu Hirano, and Isao Nihei

Abstract

High temperature tensile tests were performed on SUS304, SUS321 and 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel to verify the tensile properties of Materials Strength Standard for Monju. Tensile tests were also performed at ultra-high temperatures (up to 900°C) on SUS304 and SUS321 steel plates and SUS321 steel forging. Evaluation of high temperature and high strain rate tensile properties which simulate the tensile condition of sodium-water reaction was made. Major results obtained are as follows:

- (1) Tensile properties of SUS304, SUS321 and 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel below 650°C.
 - (i) Tensile strength and 0.2% proof strength did not fall below the design tensile strength and design yield strength respectively.
 - (ii) Fracture elongation and reduction of area agreed well with those of references, and showed satisfactory values.
 - (iii) Elasto-plastic parameters were almost comparable with those for Monju design. This proves the validity of Elasto-plastic parameters for Monju.
- (2) Tensile properties of SUS304 steel plate, SUS321 steel plate and forging at 650~900°C.
 - (i) Tensile properties data (tensile strength, 0.2% proof strength, fracture elongation and reduction of area) were obtained up to 900°C at strain rates of 1 and 10%/min.
 - (ii) Fracture elongation and reduction of area of these steels were high enough, and improved as the strain rate increased.
 - (iii) An attempt to evaluate the effect of strain rate on tensile strength was made. Applying this to the ultra-high temperature data at 1~10%/min, tensile strength under JIS high temperature test condition was estimated.

* Materials Development Section, Systems and Components Division, O-arai Engineering Center.

目 次

1 まえがき	1
2 試験方法	2
2-1 素材及び試験片	2
2-2 引張試験方法	2
3 試験結果	3
3-1 0.2%耐力および引張強さの温度依存性	3
3-2 破断伸びおよび紋りの温度依存性	4
3-3 真応力-真ひずみ挙動	4
3-4 弹塑性パラメータ	5
4 検討	7
4-1 材料強度基準等との比較検討	7
4-2 強度におけるひずみ速度の影響について	7
4-3 超高温域までのひずみ速度を考慮した引張強さ最適値推定の試み	8
5 まとめ	9
参考文献	10
付録	13

List of Tables

Table 1	Certification Test Results of SUS 304 stainless steel plate (Heat No. 524772-02)	11
Table 2	Certification Test Results of SUS 321 stainless steel plate (Heat No. A 242905-1)	12
Table 3	Certification Test Results of SUS 321 forged steel (Heat No. 80L 95-1-3)	13
Table 4	Certification Test Results of 2½Cr-1Mo steel plate (Heat No. 81C 625-4-1)	14
Table 5	Specification of Tensile Test Machine	17
Table 6	Condition of Tensile Test	18
Table 7	Calculated tensile strength at strain rate of 7.5%/min (JIS strain rate)	50
Table 8	Least square fitting curves for tensile strength up to 900°C	54

(Appendix)

TableA1	Tensile test results of SUS 304 steel (plate)	55
TableA2	Tensile test results of SUS 321 steel (plate)	56
TableA3	Tensile test results of SUS 321 steel (forged)	57
TableA4	Tensile test results of 2½Cr-1Mo steel (plate)	58
TableA5	Elasto-plastic parameters of SUS 304 (plate)	59
TableA6	Elasto-plastic parameters of SUS 321 (plate)	60
TableA7	Elasto-plastic parameters of 2½Cr-1Mo steel (plate)	61

List of Figures

Fig. 1	Tensile test specimen	15
Fig. 2	Tensile test apparatus	16
Fig. 3	0.2% proof strength and tensile strength of SUS 304 stainless steel plate	19
Fig. 4	0.2% proof strength and tensile strength of SUS 321 stainless steel plate	20
Fig. 5	0.2% proof strength and tensile strength of SUS 321 stainless steel forging	21
Fig. 6	0.2% proof strength and tensile strength of 2½Cr-1Mo steel plate	22
Fig. 7	Fracture elongation and reduction of area of SUS 304 stainless steel plate	23
Fig. 8	Fracture elongation and Reduction of area of SUS 321 stainless steel	24
Fig. 9	Fracture elongation and Reduction of area of 2½Cr-1Mo steel plate	25
Fig. 10	True stress-true strain curves of SUS 304 steel plate at RT	26
Fig. 11	True stress-true strain curves of SUS 304 steel plate at 550°C	27
Fig. 12	True stress-true strain curves of SUS 304 steel plate at 800°C	28
Fig. 13	True stress-true strain curves of SUS 304 steel plate at 900°C	29
Fig. 14	True stress-true strain curves of SUS 321 steel plate at 550°C	30
Fig. 15	True stress-true strain curves of SUS 321 steel plate at 900°C	31
Fig. 16	True stress-true strain curves of SUS 321 steel forging at 900°C	32
Fig. 17	True stress-true strain curves of 2½Cr-1Mo steel plate at 500°C	33
Fig. 18	Proportional limit of SUS 304 steel plate	34
Fig. 19	Proportional limit of SUS 321 steel plate	35
Fig. 20	Proportional limit of 2½Cr-1Mo steel plate	36
Fig. 21	Strain hardening exponent of SUS 304 steel plate	37
Fig. 22	Strain hardening exponent of SUS 321 steel plate	38
Fig. 23	Strain hardening exponent of 2½Cr-1Mo steel plate	39
Fig. 24	Plastic coefficient of SUS 304 steel plate	40
Fig. 25	Plastic coefficient of SUS 321 steel plate	41
Fig. 26	Plastic coefficient of 2½Cr-1Mo steel plate	42
Fig. 27	Strain rate dependence of ($\sigma_u - \sigma_p$) in SUS 304 steel plate	43
Fig. 28	Strain rate dependence of ($\sigma_u - \sigma_p$) in SUS 321 steel plate	44

Fig.29	Strain rate dependence of $(\sigma_u - \sigma_p)$ in SUS321 steel forging	45
Fig.30	Strain rate dependence of $(\sigma_u - \sigma_p)$ in $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel plate	46
Fig.31	Temperature dependence of exponent n in SUS304 steel	47
Fig.32	Temperature dependence of coefficient B in SUS304 steel	47
Fig.33	Temperature dependence of exponent n in SUS321 steel	48
Fig.34	Temperature dependence of coefficient B in SUS321 steel	48
Fig.35	Temperature dependence of exponent n in $2\frac{1}{4}$ -1Mo steel	49
Fig.36	Temperature dependence of coefficient B in $2\frac{1}{4}$ -1Mo steel	49
Fig.37	Temperature dependence of tensile strength in SUS304 steel plate at strain rate of 7.5%/min	51
Fig.38	Temperature dependence of tensile strength in SUS321 steel plate at strain rate of 7.5%/min	52
Fig.39	Temperature dependence of tensile strength in SUS321 steel forging at strain rate of 7.5%/min	53

1 まえがき

動燃事業団では、昭和 52 年度から高速原型炉「もんじゅ」候補構造材料について大気中での基本材料特性試験を実施し、「もんじゅ」の高温構造設計方針および材料強度基準等の策定を行なってきた。

そして、昭和 57 年度からは、基本材料特性データを拡充し、この「もんじゅ」の高温構造設計方針および材料強度基準等を確認・検証するため、新たな大気中構造材料試験（以下、Step III 試験計画）を実施した。

本報では、この Step III 試験計画の諸試験のうち、①基本材料特性データ拡充の一環としての高温引張試験、および、②ナトリウム-水反応時を想定した構造材料の高ひずみ速度超高温引張試験、について報告する。

上記①、②の各試験では、同一素材についての短時間引張特性試験という共通性はあるものの、引張試験のひずみ速度が異なっており、一元的な取扱いには困難が予想される。しかし、Step III 計画では、ひずみ速度 0.03~0.003%/min での低ひずみ速度引張試験も計画されており、引張試験結果へのひずみ速度の影響について考慮しておくことも必要と考えられる。そこで、先の①、②で本来目的に對して試験結果を整理するとともに、ひずみ速度の影響の観点から統一的にとらえる試みも行なった。

2 試験方法

2-1 素材および試験片

下記の(イ)～(ハ)に示すSUS 304およびSUS 321鋼および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼を供試材とした。

イ) SUS 304 鋼	板 材	$40^t \times 1,000^l \times 1,000^w$
ロ) SUS 321 鋼	伝熱管相当板材 鍛造材	$12^t \times 1,000^l \times 1,000^w$
		$350^t \times 1,000^l \times 750^w$
ハ) $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼	板 材	$30^t \times 1,000^l \times 1,500^w$

これら各鋼の化学成分およびミルシートに示された機械的性質をTable 1～4に示す。

各素材より、試験片長手方向が圧延方向と平行になるように、Fig. 1に示す平行部長さ50mm、径10mmのつば付試験片を加工し、試験に供した。

2-2 引張試験方法

引張試験には、タテ割型管状炉を装備したインストロン型引張試験装置を用いた。この試験装置の構成をFig. 2に、主要な性能をTable 5に示す。

上中下3分割温度制御方式の電気炉によって試験片を加熱し、1時間で試験温度に到達後30分均熱保持し、引張試験を開始した。試験中の試験片標点間の温度差は、2℃以内とした。また、試験片のつばにアームを取り付け、測定範囲の異なる独立した2組の差動トランス（変位測定範囲0～5mmおよび0～25mm）によって、ひずみを検出した。

ひずみ速度の設定は、下記の2種類のタイプを用いた。

イ) ひずみ速度切替 (JISG 0567 準拠)	$\left\{ \begin{array}{l} \text{ひずみ } 3\% \text{まで} \\ \text{ } 3\% \sim \text{破断} \end{array} \right.$
ロ) 一定ひずみ速度	$\left\{ \begin{array}{l} \text{破断まで} \\ \text{ } 0.3, 1.0, 10.0 \%/\text{min} \end{array} \right.$

これらのひずみ速度条件と鋼種との組合せをTable 6に示す。

3 試験結果

各鋼種の超高温および高温引張試験結果を付録 Table A1～A4 に示す。

3-1 0.2% 耐力および引張強さの温度依存性

各鋼種における 0.2% 耐力および引張強さの温度依存性を Fig. 3～6 に示す。ステンレス鋼については JIS 規格内の鋼材の有する強度の平均傾向を表わす最適曲線¹⁾および 95% 信頼下限を示す保証可能値¹⁾を、 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼については鉄鋼協会調査の平均値²⁾を記した。さらに、 Fig. 3～6 には、「もんじゅ」の材料強度基準値³⁾も併記した。なお、ステンレス鋼の最適曲線は温度の 5 次式により 800°C までの温度範囲に対して規定されているが、 900°C へも単純に外挿してプロットした。

これらの図では、ひずみ速度の異なるデータが同時にプロットされており、 0.2% 耐力および引張強さは、ひずみ速度により若干変化する結果が得られた。これらのひずみ速度の影響については後節で定量的な取扱いを試みることにし、ここでは、温度依存性の面から概観する。

なお、その前に、 650°C 以下の引張試験結果につき「もんじゅ」の材料強度基準値と比較し、材料強度基準値の妥当性検証をしておくこととする。SUS 321 鋼伝熱管相当板材および鍛造材、 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼板材について JIS に準拠した引張試験条件で得られた引張強さおよび 0.2% 耐力は、 Fig. 4～6 に示すように、最適値あるいは平均値とほぼ一致していた。また、これらは「もんじゅ」材料強度基準値 S_u, S_y を十分上回っていた。

これに対し、 Fig. 3 に示す SUS 304 鋼板材の結果では上記の 2 鋼種の場合と異なり、引張強さおよび 0.2% 耐力ともステンレス協会の最適値を下廻る傾向がみられた。特に、 300°C 以下の 0.2% 耐力は設計降伏強さ S_y とほとんど一致していた。

a) SUS 304 鋼

図 3 に示すように、 SUS 304 鋼の 0.2% 耐力はステンレス協会の最適曲線¹⁾（以下最適曲線）より若干下廻っており、低温側ではむしろ材料強度基準値³⁾（以下基準値）に近い値を示した。しかし、試験温度の上昇に伴ない基準値より高まる傾向がみられ、 650°C では基準値より約 2～3 kg/mm² 上回った。

同図で引張強さも最適曲線より下廻った。しかし、 JIS 条件およびひずみ速度 10%/min の結果は、最適曲線とほぼ一致した。なお、試験温度 900°C においては、 0.2% 耐力と引張強さがほぼ同じ値となった。

b) SUS 321 鋼

Fig. 4, 5 に伝熱管相当板材および鍛造材についての 0.2% 耐力および引張強さを示す。

Fig. 4 の伝熱管相当板材に関して、 0.2% 耐力は 900°C までの温度範囲でステンレス協会の最適曲線にほぼ一致しており、基準値および保証可能値より約 4 kg/mm² 上回っていた。JIS 条件およびひずみ速度 10%/min での引張強さも、 900°C まで最適曲線と一致しており、基準値および

保証可能値を上回り、安全側に位置していた。

Fig. 5 に鍛造材についての結果を示す。「もんじゅ」材料強度基準において、SUS 321 鋼鍛造材には SUS 304 鋼板材の基準が適用されることになっている³⁾。したがって、ここでもこれを比較として用いることにした。また、最適曲線および保証可能値も SUS 304 鋼板材のものを用いた。

Fig. 5 で、引張強さはほぼ最適曲線を中心として分布しており、0.2%耐力は各温度とも最適曲線より十分高い値を示した。

c) 2½Cr-1Mo鋼

Fig. 6 に示すように、0.2%耐力は鉄鋼協会の平均値²⁾（以下平均値）とほぼ一致しており、基準値をはるかに上回っていた。

引張強さもほぼ平均値に一致したが、200°Cまでは平均値を上回り、それ以上になると平均値を約 2kg/mm² 程下回った。JIS 条件での引張強さは基準値より約 4~5kg/mm² 程上回る値を示した。

Fig. 6 に示したように平均値には 400°C 前後に青熱脆性によると思われる極大が存在しているが、今回の供試材では 400°C 前後で極大がみられずテラス状に変化していた。

3-2 破断伸びおよび紋りの温度依存性

各鋼材の高温および超高温における破断伸びおよび紋り値を Fig. 7~9 に示す。なお、各図に動燃報告書^{4)~6)}の値も併記した。

SUS 304、321 鋼および 2½Cr-1Mo 鋼とも、高温域における破断伸びおよび紋りは、報告書^{4)~6)}の値とほぼ一致した。

引張強さの極大あるいはプラトーに対して（SUS 304 および 321 鋼では約 500°C、2½Cr-1Mo 鋼では約 400°C），破断伸びあるいは紋りに極小がみられ、これ以上の温度では、これらの引張破断延性に著しい上昇がみられた。しかし SUS 304 鋼の破断紋りのみは 500°C で極小を示さず、600°Cまで温度依存性の少ない特異な挙動を示した。

超高温での引張延性へのひずみ速度の効果は、特に Fig. 8 の SUS 321 鋼で明瞭であり、高ひずみ速度程延性が向上する傾向がみられた。

3-3 真応力-真ひずみ挙動

各鋼種における真応力-真ひずみの関係を別報⁷⁾に示す。各図には、「もんじゅ」材料強度基準³⁾に示される各鋼種の弾塑性応力-ひずみ関係式（BDS 式）から求めた関係も併記した。この場合 BDS 式の適用範囲外の 650°C を超える超高温域についても BDS 式から単純に求めた値を参考として記入した。これらの真応力-真ひずみ関係の代表例を Fig. 10~17 に示してある。

a) SUS 304 鋼

室温から 650°C の温度域での SUS 304 鋼の真応力は、Fig. 10 および 11 に例示するように、B

DS式から求まる値より低かった。これは、BDS式での比例限応力 σ_p が、今回の試験値に比べ低いためと思われる。また、超高温域においては、Fig. 12, 13 に示すように、BDS式の外挿と比較して加工硬化が少なかった。さらに試験温度 900°C (Fig. 13) においては、ほとんど加工硬化がみられなかった。これは、Fig. 3 での 0.2% 耐力と引張強さが 900°C ではほぼ一致していたことに対応している。

b) SUS 321 鋼

SUS 321 鋼板材の真応力 - 真ひずみ挙動は、Fig. 14 に例示するように、BDS式によりほぼ記述できる。BDS式の適用温度を超える温度域では、SUS 304 鋼の場合と同様、BDS式から単純外挿と異なる挙動が観察され、Fig. 15 に示すように 900°C では 1.0%/min および 10%/min とも加工硬化がほとんどみられなかった。

超高温域での SUS 321 鋼鍛造材の真応力 - 真ひずみ挙動を、Fig. 16 に例示する。Fig. 15 に示した SUS 321 鋼板材の場合と同じく、加工硬化の程度は少ない。

c) 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼

2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の 550°C までの真応力 - 真ひずみ挙動は、Fig. 17 に例示するように、ほぼ BDS式と一致した。

3-4 弹塑性パラメータ

「もんじゅ」材料強度基準での真応力 - 真ひずみ関係は次の弾塑性応力 - ひずみ関係式で整理されている³⁾。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_t &= \epsilon_e + \epsilon_p \\ \epsilon_e &= \frac{\sigma^*}{E} \\ \epsilon_p &= \left(\frac{\sigma^* - \sigma_p}{k} \right)^{\frac{1}{m}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

- ここで σ : 真応力 [kg / mm²]
 σ^* : 比例限応力 [kg / mm²]
 m : 加工硬化指数 [-]
 k : 塑性係数 [kg / mm²]
 ϵ_t : 全ひずみ [mm / mm]
 ϵ_p : 塑性ひずみ [mm / mm]
 ϵ_e : 弹性ひずみ [mm / mm]
 E : ヤング率 [kg / mm²]

そこで、この関係式を用い、各試験結果での各パラメータ m, k を求めた。比例限応力 σ_p とヤング率 E は、チャートから読み取った値を用いた。 σ_p, m, k の値を付録 Table A 5 ~ A 7 に、試

験温度の関係を Fig. 18~27 に示す。これらの図には、BDS式³⁾も併記した。

a) 比例限応力 (σ_p)

SUS 304 鋼およびSUS 321 鋼の比例限応力と試験温度の関係を Fig. 18 および 19 に示す。1 および 10 %/min のひずみ速度で比例限応力に有意な差がみられないことから、比例限応力がひずみ速度に依存しないと仮定し、室温から 900°Cまで値を 3 次式で多項式近似した。結果を以下に示す。

$$\text{SUS 304 plate} \quad \sigma_p = 0.155 \times 10^2 - 0.389 \times 10^{-1}T + 0.716 \times 10^{-4}T^2 - 0.467 \times 10^{-7}T^3 \quad (2)$$

$$\text{SUS 321 plate} \quad \sigma_p = 0.181 \times 10^2 - 0.359 \times 10^{-1}T + 0.676 \times 10^{-4}T^2 - 0.477 \times 10^{-7}T^3 \quad (3)$$

$$\text{2\frac{1}{4}Cr-1Mo plate} \quad \sigma_p = 0.351 \times 10^2 - 0.391 \times 10^{-1}T + 0.418 \times 10^{-4}T^2 - 0.443 \times 10^{-7}T^3 \quad (4)$$

Fig. 18 に示すように、SUS 304 鋼の比例限応力 σ_p は 650°C 以下では BDS 式およびその外挿値より 1.5 kg/mm² ほど低目に平行移動した値であった。また、Fig. 19 に示す SUS 321 鋼の 650°C 以下の比例限応力の場合には、BDS 式およびその低温側への外挿値を約 2 kg/mm² 程高目に平行移動した値であり、650°C 以上の超高側では BDS 式の外挿線とほぼ同じ値を示した。SUS 304 および 321 鋼とも BDS 式より 1.5 ~ 2 kg/mm² 程値がずれていたが、試験値のバラツキの範囲内であり、BDS 式の妥当性に問題はないと思われる。

2\frac{1}{4}Cr-1Mo鋼の比例限応力につき SUS 304 および 321 鋼と同様に整理した結果を Fig. 20 に示す。実験値は BDS 式および低温側への外挿値とよく一致しており BDS 式の妥当性に問題がない。

b) 加工硬化指数 (m) と塑性係数 (k)

SUS 304 および SUS 321 鋼板材、2\frac{1}{4}Cr-1Mo鋼板材の加工硬化指数 (m) および塑性係数 (K) の温度依存性を Fig. 21~26 に示す。これらの図には、BDS 式での値も併記した。BDS 式の適用温度域である 300~650°C で、パラメータ m, k の値はいずれの鋼種においても BDS 式より若干高目であったが、その温度依存性は、BDS 式とほぼ同等であった。

Fig. 21~22 および 24~25 には、650°C を超える超高温引張試験での m, k の値も示している。これらの値は、ひずみ速度が 1 および 10% / min で得られたものであるが、鋼種によらず 650°C 以下の値と比較して極めて低い値となった。超高温域では、Fig. 12, 13, 15, 16 にみられるように加工硬化量が少なくなるため、パラメータ m あるいは k の値を正確に求めることが難しい。しかし超高温域での両パラメータの急激な低下は引張破断伸びおよび紋りの急激な上昇と対応しており、700°C 前後を境として変形のモードが変化していることを想像させる。

4 檢 討

4-1 材料強度基準等との比較検討

RT～650℃の温度域で、JISに準拠した方法で引張試験した結果につき、材料強度基準等³⁾と比較、検討する。

すでに、3章で述べたように、各鋼材での引張強さ、0.2%耐力は材料強度基準値 S_u , S_y を下廻ることはなかった。また、引張破断伸びおよび紋りは各鋼材とも良好な値を示した。さらに、弾塑性パラメータ σ_p , m , k についても、材料強度基準等とほぼ同等の結果が得られ、BDS式の妥当性が確認された。

しかし、今回の試験に用いたSUS304鋼は引張強さおよび0.2%耐力ともステンレス協会の最適値を下廻る傾向がみられた。しかし、その程度は顕著でなく、また設計降伏点 S_y を下廻ることはなかった。

4-2 強度におけるひずみ速度の影響について

Hollomonらは⁸⁾、試験温度およびひずみ量が一定の条件で真応力 σ^* へのひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の影響を次式で表わしている。

$$\sigma^* = B \cdot \dot{\epsilon}^n \quad (5)$$

ここで B, n は試験温度、ひずみ量により定まる定数

(5)式において σ^* として引張強さ σ_u から比例限応力 σ_p を差し引いたものを考え、引張強さの得られるひずみ量が試験温度ひずみ速度によらず一定であると仮定すると、次式(6)が得られる。(6)式を用いて試験データを解析した。

$$\log(\sigma_u - \sigma_p) = \log B + n \log \dot{\epsilon} \quad (6)$$

Fig. 27～30 に示すように、試験温度が高くなる程、傾き n は大きくなり $\log B$ は低下した。そこで、Fig. 27～30 の各試験温度の傾きおよび切片から(6)式の B および n を求め、これらの温度依存性を評価した。結果を Fig. 31～36 に示す。これらの図から、 n あるいは B の試験温度依存性は、鋼種によらずよく一致した挙動を示し、 n は温度と共に2次曲線的に増加し、 B は温度と共に3次曲線的に低下した。そこで、 n および B を試験温度 T の2次式および3次式で近似し、次に示す回帰式を得た。回帰式の計算結果は Fig. 31～36 図中に実験値とオーバープロットして示してある。

$$\text{SUS 304} \quad n = 0.155 - 0.98 \times 10^{-3} T + 0.141 \times 10^{-5} T^2 \quad (7)$$

$$\text{plate} \quad B = -0.147 \times 10^3 + 0.963 T - 0.161 \times 10^{-2} T^2 + 0.809 \times 10^{-6} T^3 \quad (8)$$

$$\text{SUS 321} \quad n = 0.503 - 0.192 \times 10^{-2} T + 0.182 \times 10^{-5} T^2 \quad (9)$$

$$\text{plate} \quad B = -0.116 \times 10^3 + 0.779 T - 0.126 \times 10^{-2} T^2 + 0.597 \times 10^{-6} T^3 \quad (10)$$

$$\text{SUS 321} \quad n = 0.526 - 0.217 \times 10^{-2} T + 0.218 \times 10^{-5} T^2 \quad (11)$$

$$\text{forging} \quad B = -0.123 \times 10^3 + 0.813 T - 0.134 \times 10^{-2} T^2 + 0.662 \times 10^{-6} T^3 \quad (12)$$

$$2\frac{1}{4}\text{Cr-} \quad n = 1.885 - 0.914 \times 10^{-2} T + 0.118 \times 10^{-4} T^2 \quad (13)$$

$$1\text{Mo plate} \quad B = -0.235 \times 10^3 + 1.517 T - 0.860 \times 10^{-2} T^2 + 0.165 \times 10^{-5} T^3 \quad (14)$$

以上の検討により(6)式中のBおよびnが試験温度(RT~900°C)の関数として決定された。(6)式中の σ_p は(2)~(4)式で既に温度の関数として表現されている。したがって(6)式を用いることにより、RT~900°Cの任意の温度、0.3~10.0%/minの任意のひずみ速度での引張強さを求めることが可能である。

一方、0.2%耐力についてはFig. 3~6でひずみ速度依存性が少しく系統的な変化も認められなかったので、ひずみ速度依存性についての検討は行なわなかった。

4-3 超高温域までのひずみ速度を考慮した引張強さ最適値推定の試み

はじめに述べたように、本報告の試験では650°Cを境として引張ひずみ速度条件が異なっている。0.3%/min, 1%/min, および10%/minでは、超高温での0.2%耐力に有意なひずみの速度依存性が認められなかった。しかし、引張強さにはひずみ速度依存性が認められ、室温~900°Cまでの引張試験結果を一元的に取扱うことが難しい。そこで、4章の方法を用い、超高温域での引張強さから、JISに準拠した7.5%/minのひずみ速度での引張強さを計算し、650°C以下の引張強さと比較、検討してみた。

Table 7 中には、SUS 304 および 321 鋼板材に対する引張強さの計算値を示す。この計算には、(6)式の他(2)~(3), (7)~(10)式の回帰式を用いた。これらを650°Cまでの高温域での引張強さの実測値と共に回示するとFig. 37 および 38 のごとくとなる。計算値は実測値の滑らかな延長上にあり、それぞれの図中の点を用い、5次式で近似すると、Table 8 中の結果が得られた。

一方、SUS 321 鍛造材については、650°C以下のいわゆる高温域でのJISに準拠した引張強さの実測値がないため、4章の方法で500~900°Cの値を求めた。計算に用いた式は、(6)式の他(3), (9)~(10)式である。計算結果をTable 7 中に示す。計算値を引張温度に対してプロットすると、Fig. 39 のように図示される。室温引張強さを含めて5次式で近似するとTable 8 中の式が得られた。

5 ま と め

SUS 304 鋼板材、SUS 321 鋼伝熱管相当板材および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼板材について、高温引張強度試験を行ない、「もんじゅ」材料強度基準の短時間強度について妥当性の確認を行なうと共に、SUS 304 鋼板材およびSUS 321 鋼伝熱管相当板材、鍛造材について、超高温域の短時間強度試験を評価し、超高温域での引張強さを推定することを試みた。主な結果は、次の通りである。

- 1) 高温引張強度 ($\leq 650^{\circ}\text{C}$)
 - i) SUS 304、321 鋼および $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の板材あるいは伝熱管相当板材では、0.2%耐力および引張強さとも 650°C まで「もんじゅ」材料強度基準値を下廻ることはなかった。しかし、SUS 304 鋼板材の 300°C 以下の0.2%耐力は設計降伏強さ S_y とほとんど一致した。
 - ii) 各鋼板材の破断伸びおよび紋りは既存データとよく一致しており、共に十分高い値を有していた。
 - iii) 各鋼種の弾塑性パラメータの温度依存性についても、BDS式とほぼ同等の結果が得られ、BDS式の妥当性が確認された。
- 2) 超高温引張強度 ($650 \sim 900^{\circ}\text{C}$)
 - i) SUS 304 鋼板材、SUS 321 鋼伝熱管相当板材および鍛造材につき、1 および $10\%/\text{min}$ のひずみ速度で 900°C までの超高温引張試験を行ない、引張強さ、0.2%耐力、破断伸びおよび紋りのデータを取得した。
 - ii) 各鋼種の破断伸びおよび紋りは優れた延性を示した。また、高ひずみ速度で高い延性を示す傾向が認められた。
 - iii) 引張強さに対する引張ひずみ速度の影響を定量的に評価する試みを $450 \sim 900^{\circ}\text{C}$ の温度域で、SUS 304 および 321 鋼について行なった。これを用いて 900°C までのJISに準拠したひずみ速度での引張強さの推定を試みた。

本試験を実施を推進された元FBR本部構造材別グループ加納グループリーダー（現材料開発室主任研究員）および江端副主研（現；三井造船株式会社）ならびに本試験を統括された元高速炉機器開発部原田部長（現；株式会社日立製作所）、元ナトリウム材料開発室長吉利室長（現；技術情報管理室長）および高荷部長代理（現；機器構造開発部長）に深く感謝致します。
なお、試験実施およびデータ解析に際しては、下記の材料開発室常駐の協力会社員の協力を得た。

小林裕勝
鈴木高一

参 考 文 献

- 1) “ステンレス鋼の高温強度について”，田中良平：ステンレス，vol. 23 (12), P 49-63 (1979)
- 2) 鉄鋼協会データシート部会高温引張データ分科会の調査結果
- 3) “解説 高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等”，PNC SN 241 85-08
- 4) “SUS 304 鋼板材および鍛造材の引張試験および疲れ試験”，高井他：PNC SJ 203 78-08
- 5) “SUS 321 鋼伝熱管相当板材の高温強度試験”，砂本他：PNC SJ 222 78-13
- 6) “ $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼板材および鍛造材の高温強度試験”，丸山他：PNC SJ 202 78-33
- 7) 鈴木(高)他：材料開発室技術メモ 6000009 M-009 (1985)
- 8) “The Flow of Materials at Elevated Temperatures Part 1 / Part 2” J. H. Hollomon, J. D. Lubahn : General Electric Review, vol. 50 (2)/vol. 50 (1947)

Table 1 Certification Test Results of SUS 304 stainless steel plate
(Heat No. 524772-02).

a) Chemical composition

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co
product	0.05	0.59	0.87	0.027	0.003	8.97	18.47	0.12
check	0.05	0.60	0.87	0.026	0.002	8.94	18.59	0.12

b) Heat treatment

Annealed: 1100°C × 48 min W. Q.

c) Mechanical properties and grain size number

Temp. [°C]	0.2% proof stress [kg/mm ²]	Tensile strength [kg/mm ²]	Elongation [%]	Reduction of area [%]	Grain size No.
R.T.	23.0	64.0	63.0	—	4.5
550	12.0	39.0	40.0	—	

Table 2 Certification Test Results of SUS321 stainless steel plate
(Heat No.A 242905-1).

a) Chemical composition

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
product	0.08	0.55	1.50	0.027	0.003	10.40	17.25	0.47
check	0.07	0.57	1.51	0.028	0.003	10.50	17.30	0.49

b) Heat treatment

Annealed: 1100°C × 45 min W.Q.

c) Mechanical properties and grain size number

Temp. (°C)	0.2% proof stress (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Grain size No.
R.T.	29.4	61.7	53.0	—	8.5
550	17.7	41.5	35.0	—	

Table 3 Certification Test Results of SUS321 forged steel
(Heat No. 80L95-1-3).

a) Chemical composition

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti
product	0.065	0.82	1.62	0.024	0.006	11.33	19.28	0.52
check	0.065	0.81	1.61	0.023	0.007	11.26	19.44	0.53

b) Heat treatment

Annealed: 1020~1067°C × 15 hr 55 min W. Q.

c) Mechanical properties and grain size number

Temp. (°C)	0.2% proof stress (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	
R.T.	28.0	56.3	56.0	68.6	3.2
550	19.0	38.6	34.5	71.9	

Table 4 Certification Test Results of 2½Cr-1Mo steel plate
(Heat No. 81C625-4-1).

a) Chemical composition

	C	Si	Mo	P	S	Cr	Mo
product	0.15	0.50	0.60	0.035	0.035	2.50	1.10
check	0.15	0.50	0.63	0.035	0.035	2.62	1.15

b) Heat treatment

Normalized: 920~940°C × 3 hr 25 min A.C.

Tempered: 710~730°C × 5 hr 25 min A.C.

TSR: 700~710°C × 8 hr 24 min. (70°C/hr)

c) Mechanical properties* and grain size number

Temp. (°C)	0.2% proof stress (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Grain size No.
R.T.	44.0	63.0	29.5	68.6	8.0
550	37.2	47.9	20.6	68.6	

* 695~710°C × 8 hr 55 min F.C. の SR 热处理後実施

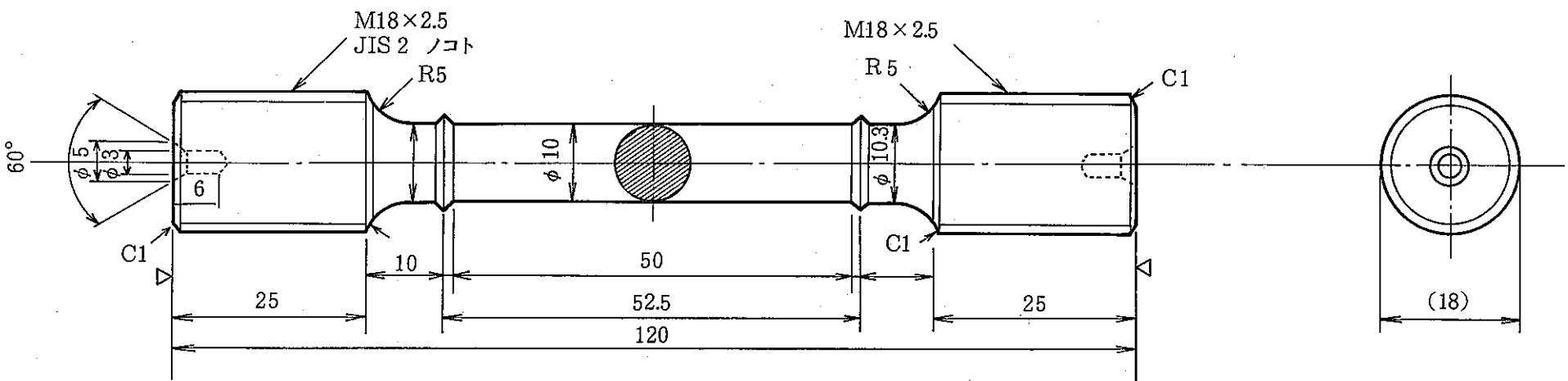
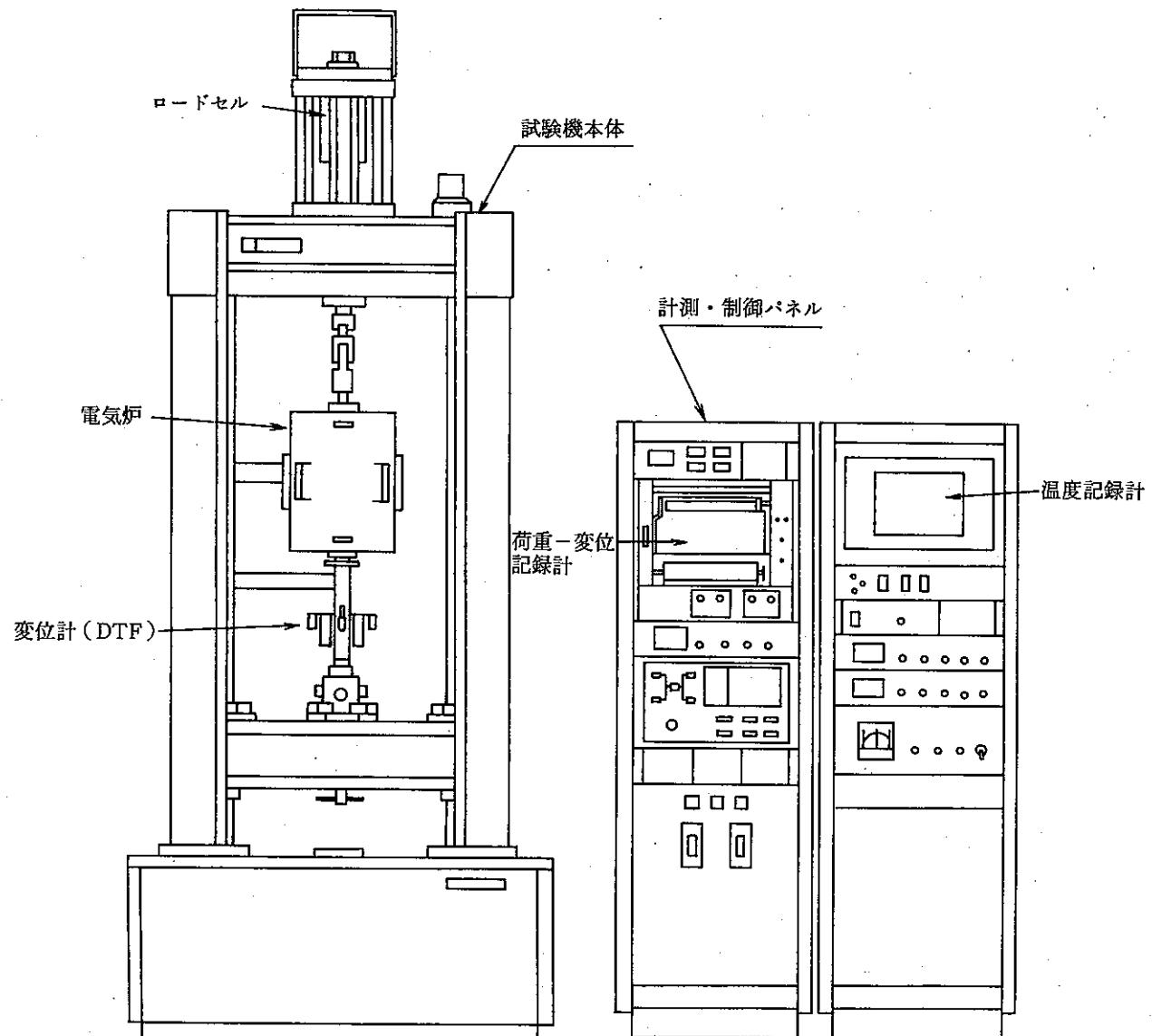


Fig. 1 Tensile test specimen.



機械の大きさ：(約)幅 1,200 × 奥行 800 × 高さ 3,000 mm

Fig. 2 Tensile test apparatus.

Table 5 Specification of Tensile Test Machine.

試験機装置名	引張試験機
1. 試験機本体 (1) 形式 (2) 最大負荷容量 (3) クロスヘッド昇降速度	島津オートグラフ DSS-25T 25TON 0.005~500 mm/min (21段切換)
2. 加熱装置 (1) 形式 (2) 使用温度 (3) 発熱体 (4) 容量	タテ割形管状炉 100~900°C ニクロム線(上中下・3回路) 3 kg
3. 温度調節装置 (1) 形式 (2) 設定期間 (3) 温度調節精度 (4) 温度検出器	PID調節によるSCR制御方式 100~900°C ±2°C PR熱電対
4. 温度測定記録装置 (1) 温度記録計	6点式(0~1,000°C)
5. 伸び測定記録装置 (1) 形式 (2) 伸び計 (3) 伸び記録計	LVDT (耐力以降 DT-5) (耐力以降 DT-25) $X_1 X_2$ TY-P形
6. 附帯設備 (1) 電源 (2) その他	1φ 200V 5KVA 100V 300VA ロードセル冷却用配管

Table 6 Condition of Tensile Test.

SUS304(plate)

試験温度 ひずみ速度[%/min]	20	100	200	300	350	400	450	500	550	600	650	700	800	900
J I S 法 ^(A)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
0.3							○	○	○	○	○			
1.0												○	○	○
10.0												○	○	○

SUS321(plate)

試験温度 ひずみ速度[%/min]	20	100	200	300	350	400	450	500	550	600	650	700	800	900
J I S 法 ^(A)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
0.3								○	○	○				
1.0												○	○	○
10.0												○	○	○

SUS321(forged)

試験温度 ひずみ速度[%/min]	20	100	200	300	350	400	450	500	550	600	650	700	800	900
J I S 法 ^(A)	○													
1.0								○		○		○	○	○
10.0								○		○		○	○	○

2 1/4Cr-1Mo(plate)

試験温度 ひずみ速度[%/min]	20	100	200	300	350	400	450	500	550
J I S 法 ^(A)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0.3						○	○	○	○

JIS法はひずみ3%まで0.3%/min, 3%以上から破断まで7.5%/minである。

0.3, 1.0, 10.0は試験中の破断までのひずみ速度%/minを表わす。

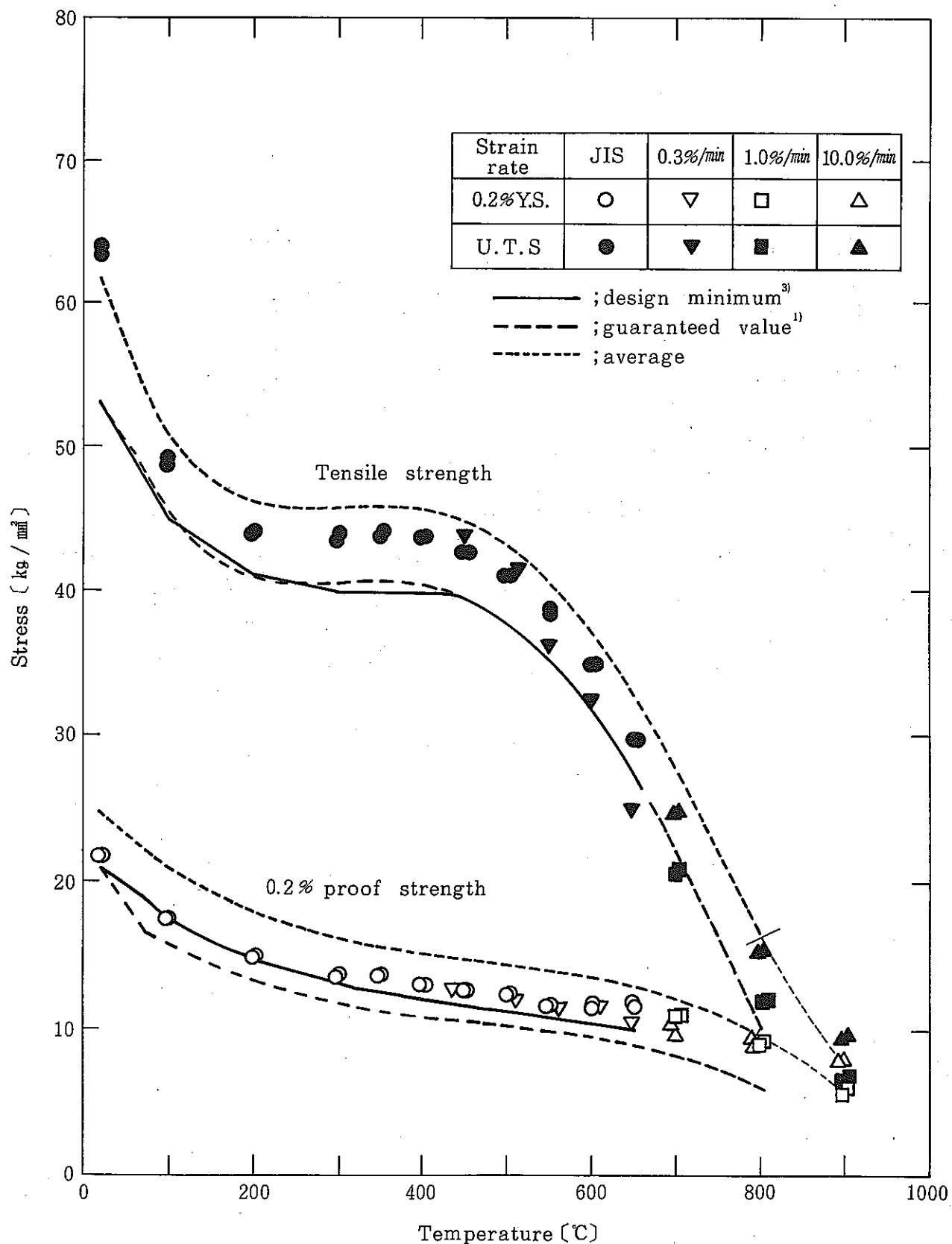


Fig. 3 0.2% proof strength and tensile strength of SUS 304 stainless steel plate.

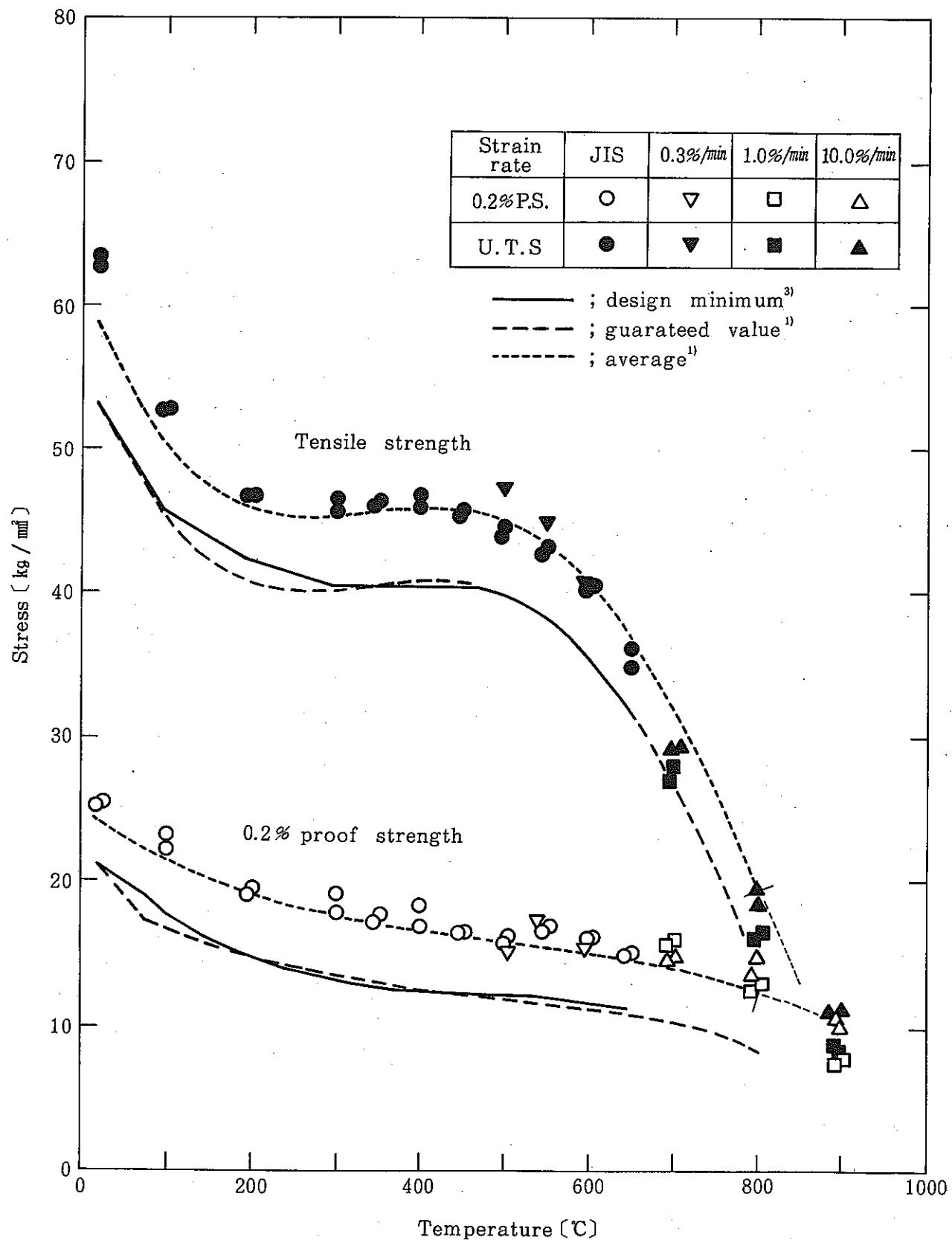


Fig. 4 0.2% proof strength and tensile strength of SUS 321 stainless steel plate.

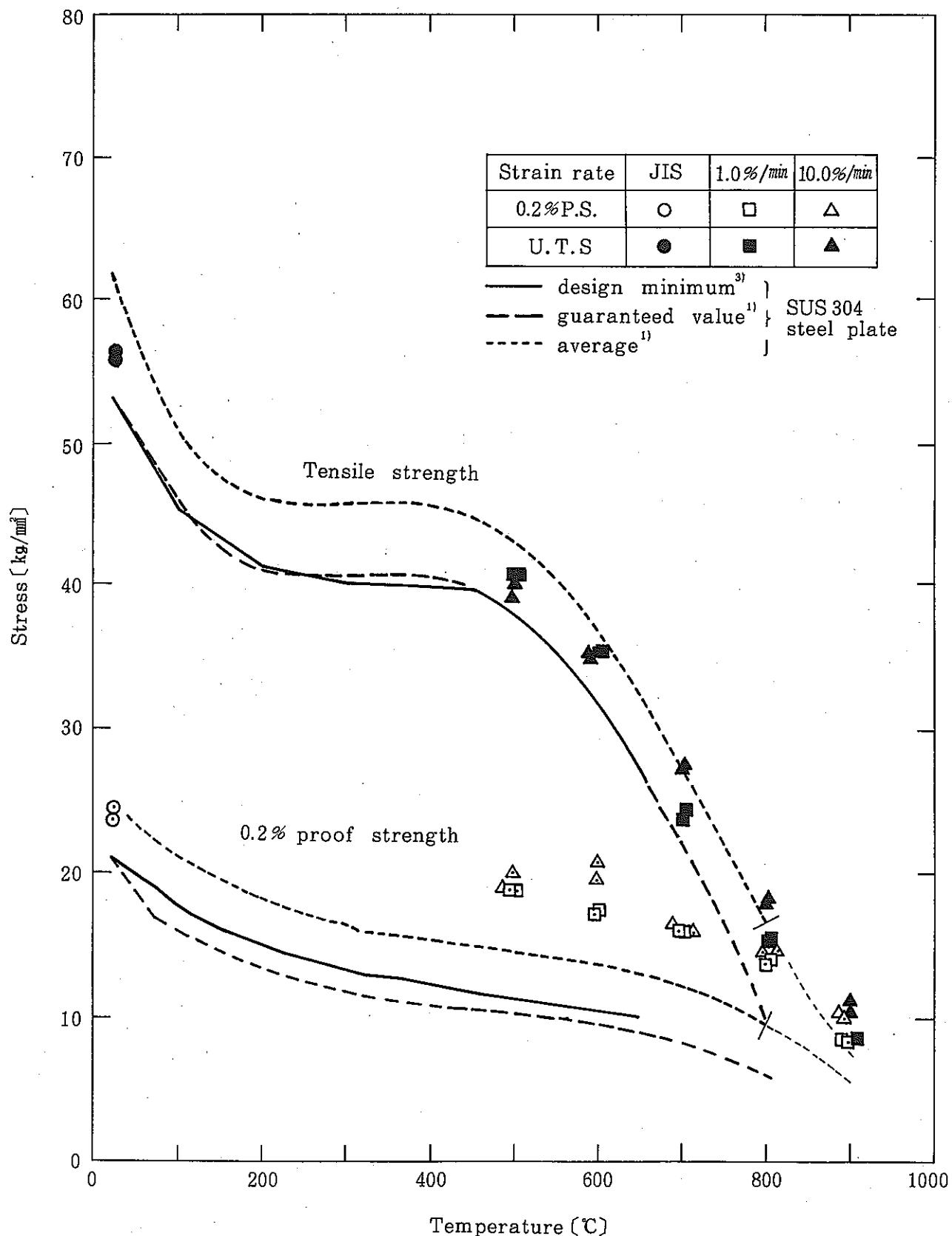


Fig. 5 0.2% proof strength and tensile strength of SUS 321 stainless steel forging.

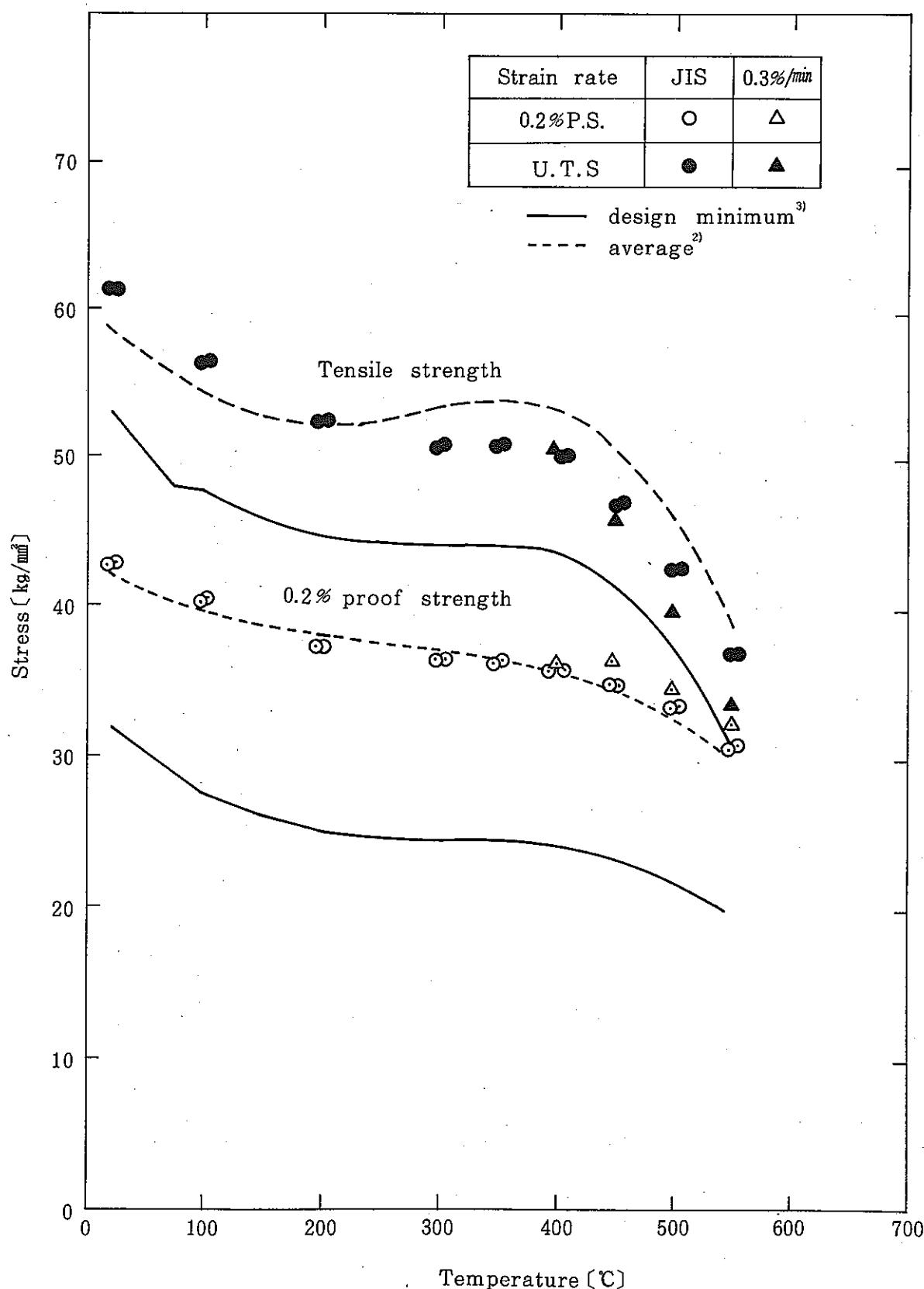


Fig. 6 0.2% proof strength and tensile strength of 2 1/4 Cr-1 Mo steel plate.

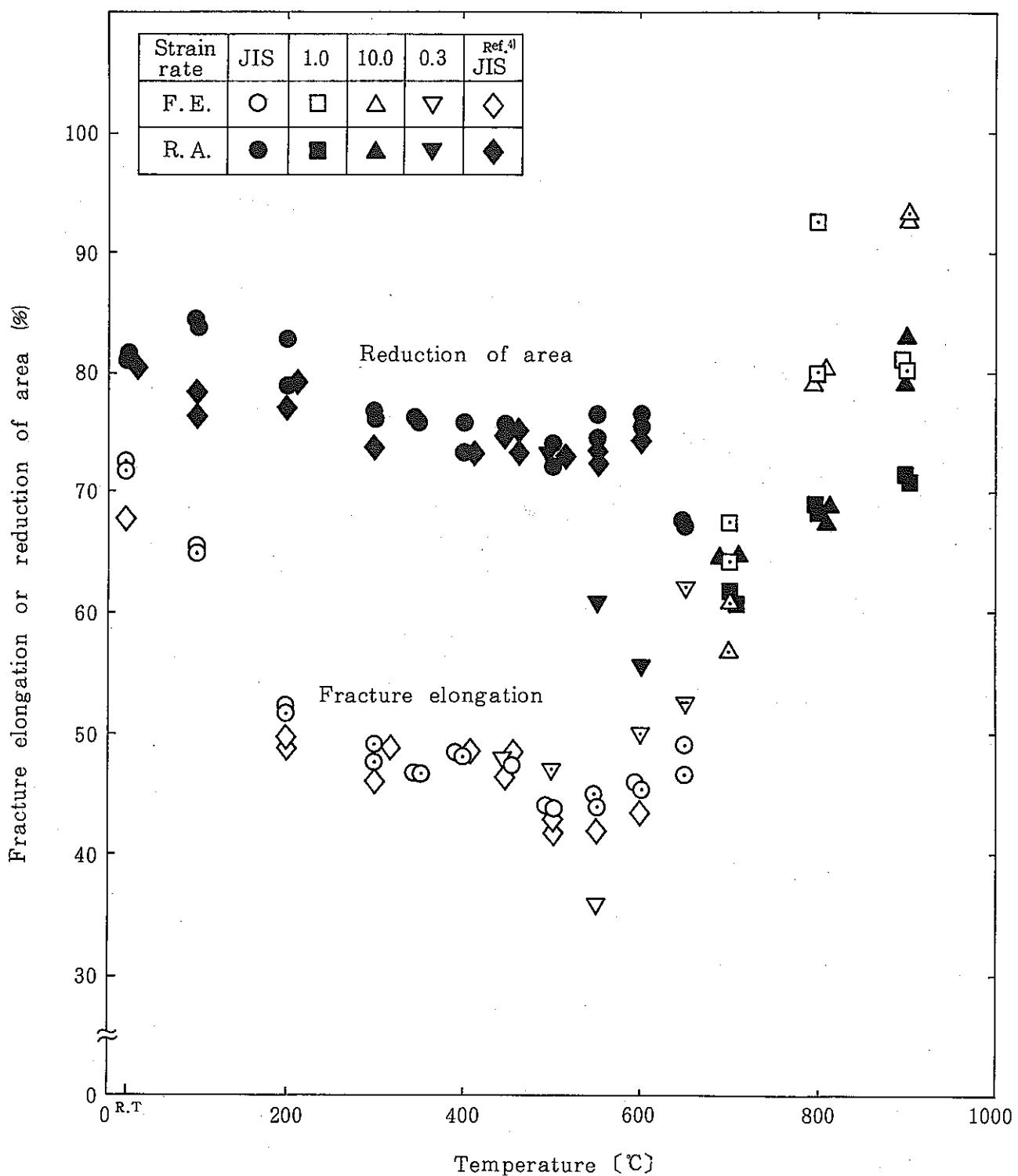


Fig. 7 Fracture elongation and reduction of area of SUS 304 stainless steel plate.

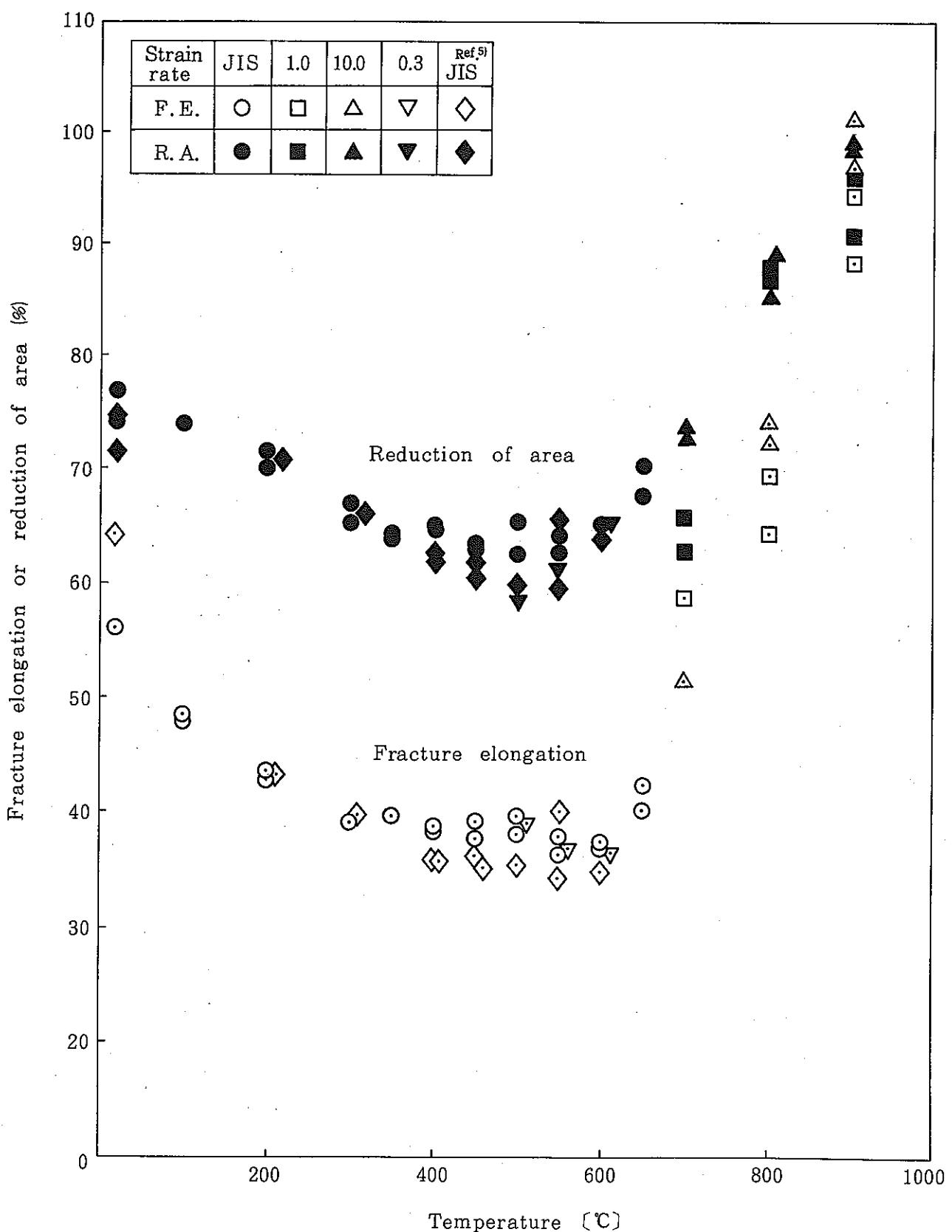


Fig. 8 Fracture elongation and Reduction of area of SUS 321 stainless steel.

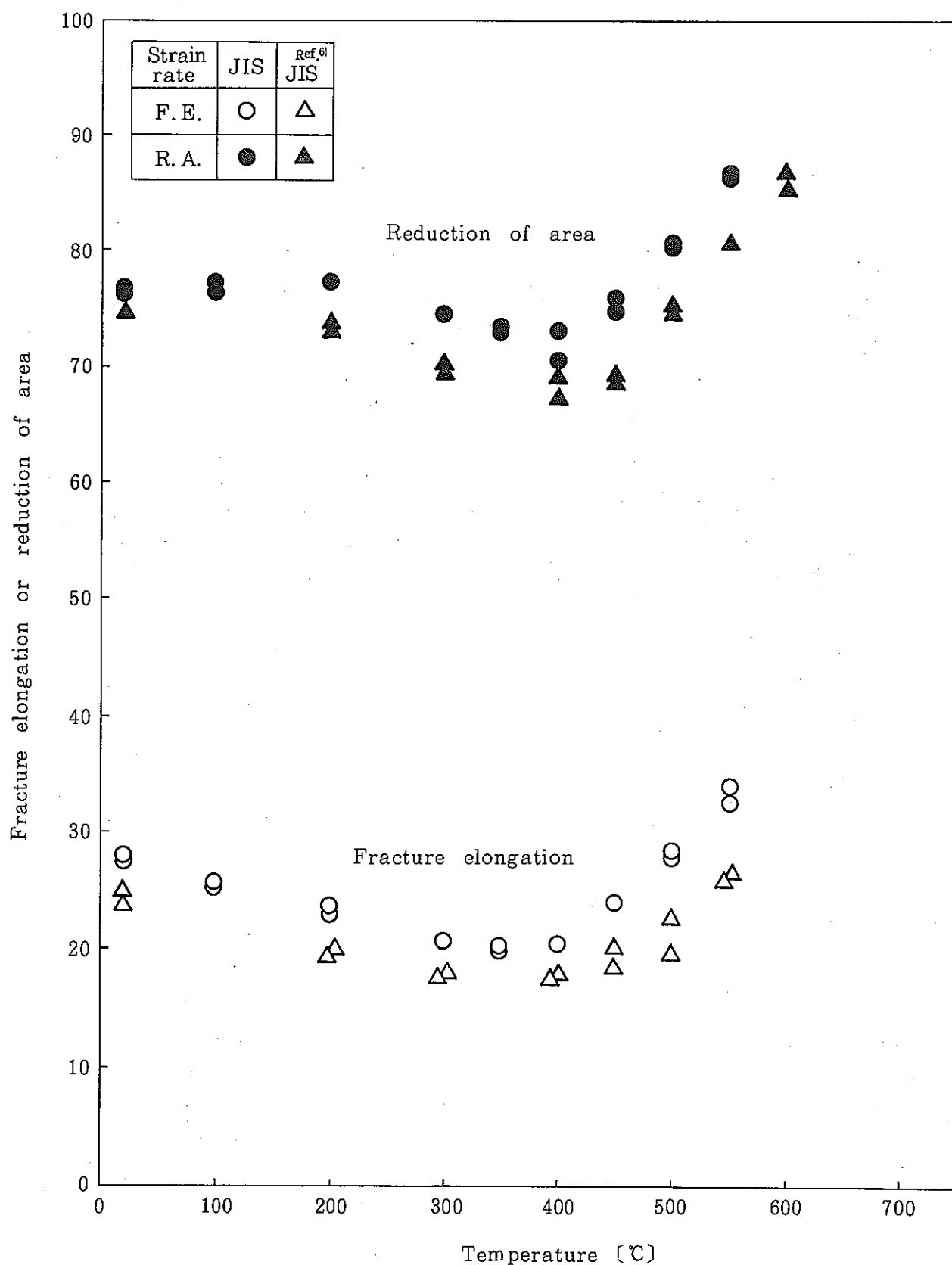


Fig. 9 Fracture elongation and Reduction of area of $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ steel plate.

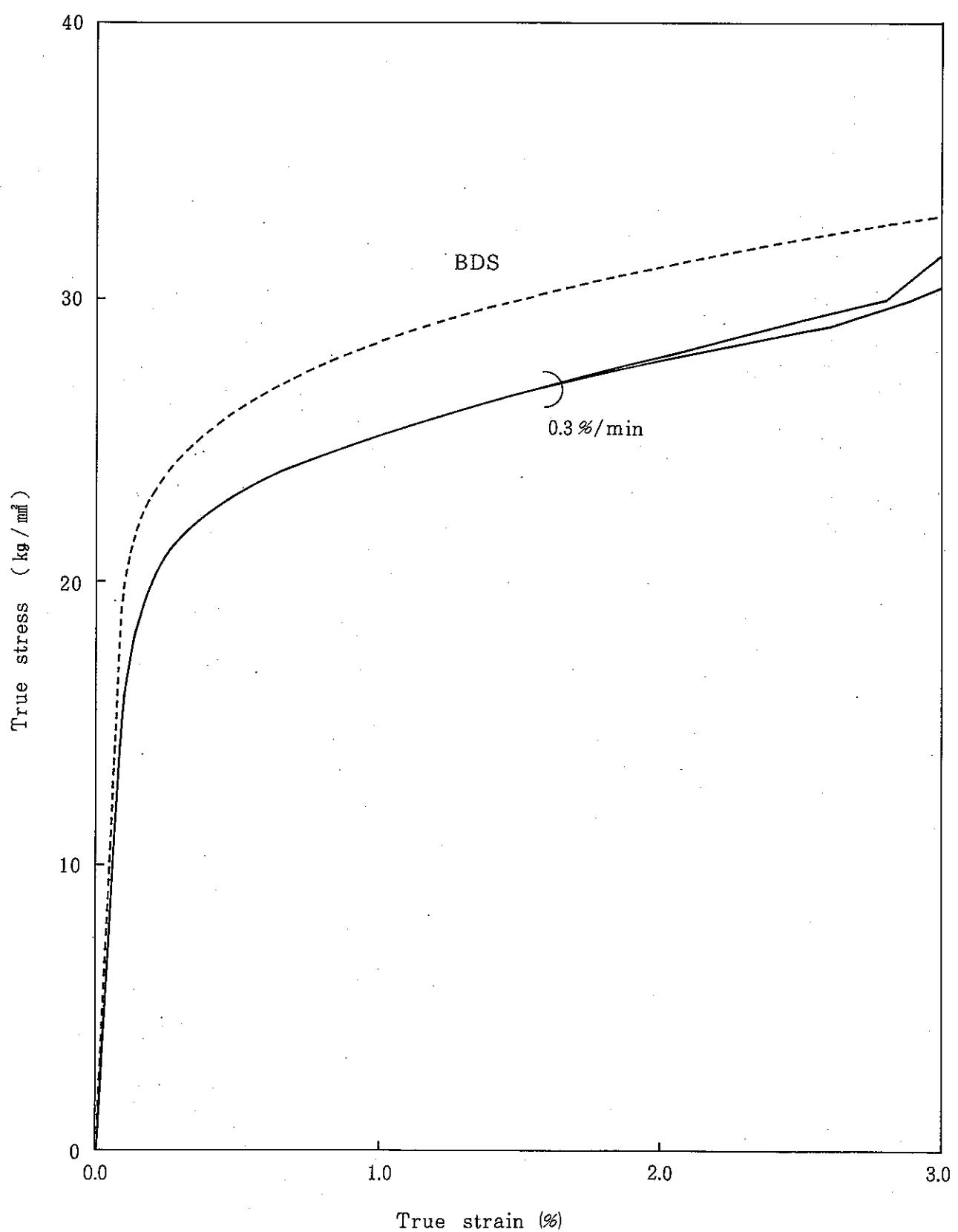


Fig.10 True stress-true strain curves of SUS 304 steel plate at RT.

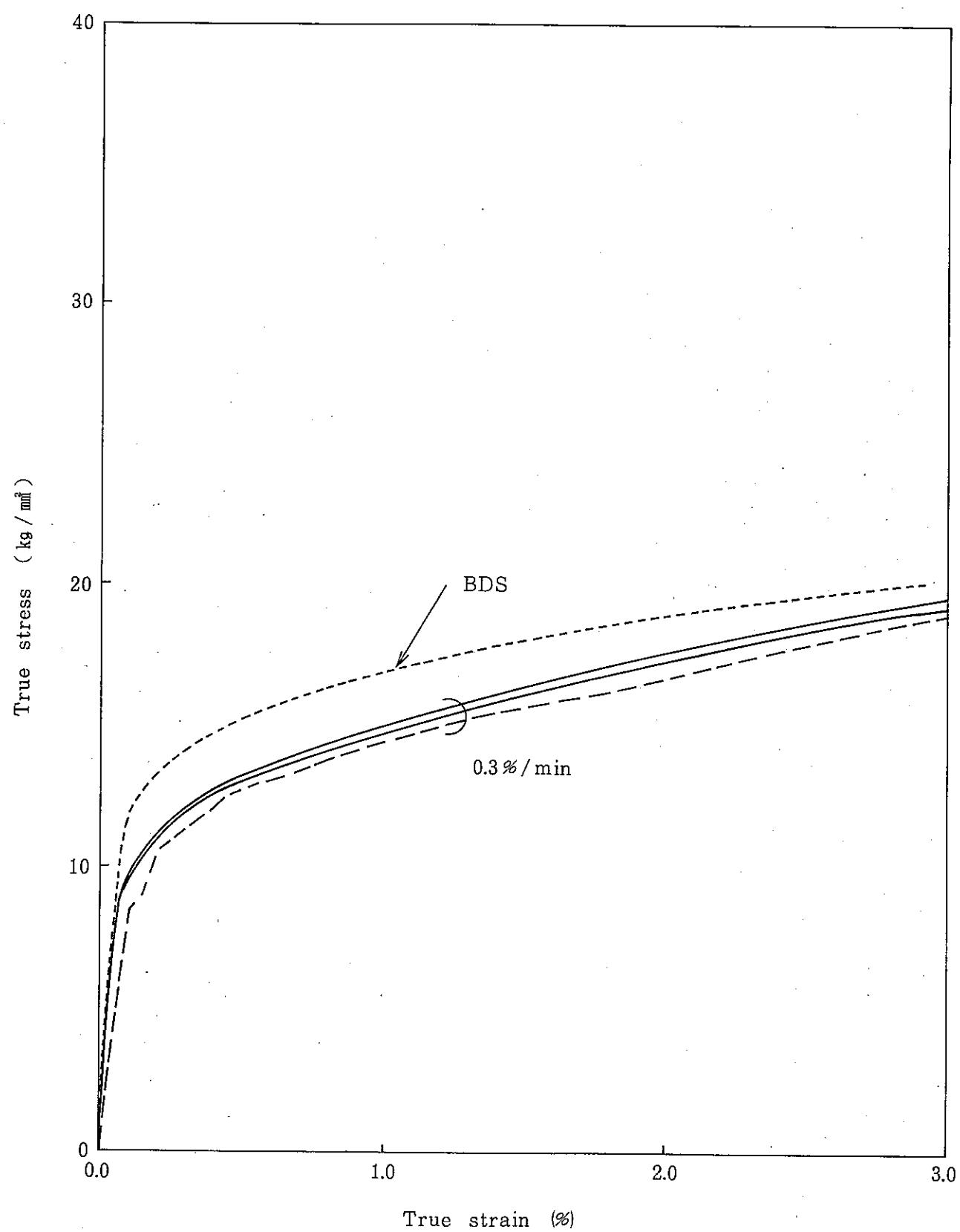


Fig.11 True stress-true strain curves of SUS 304 steel plate at 550°C.

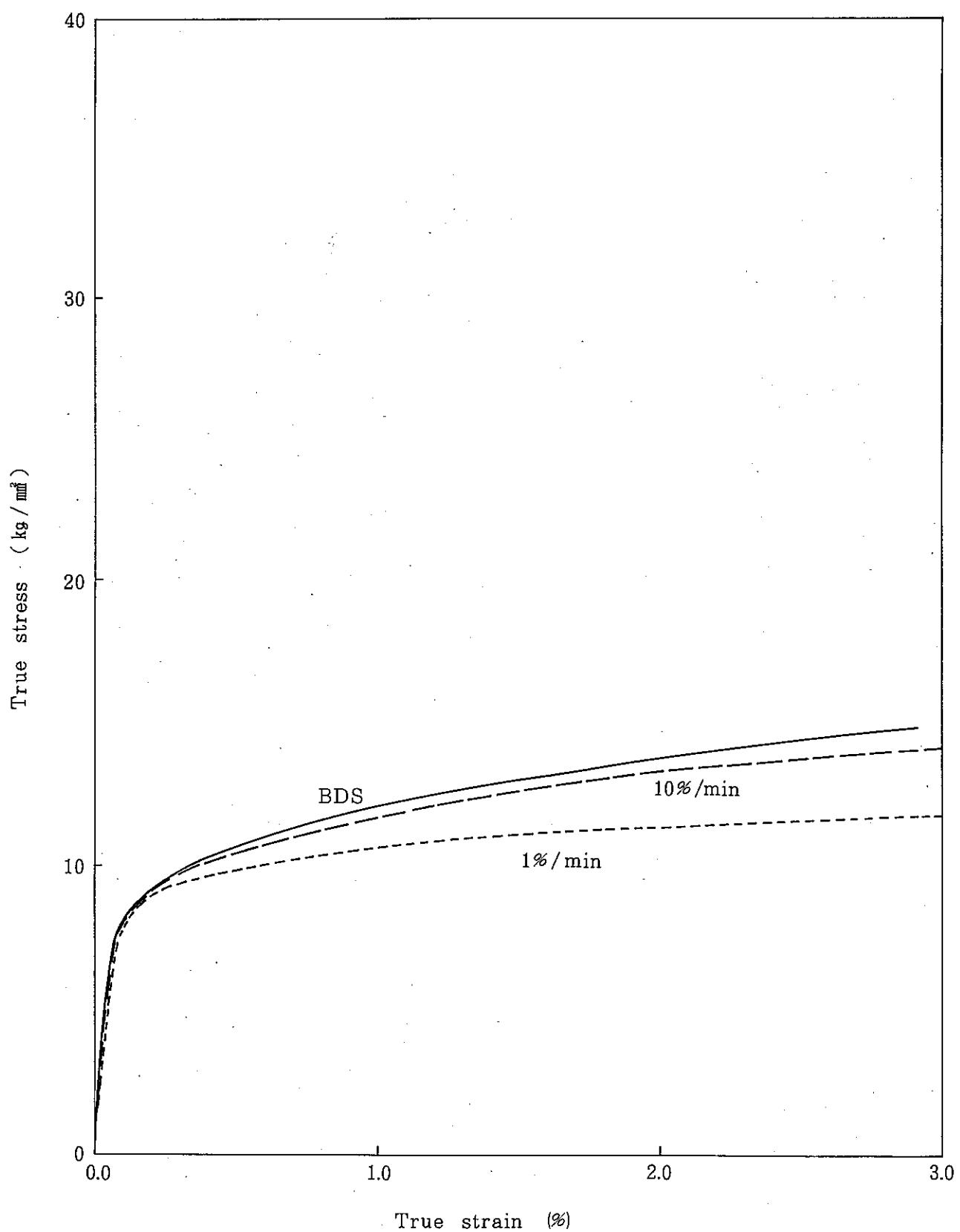


Fig.12 True stress-true strain curves of SUS304 steel plate at 800°C.

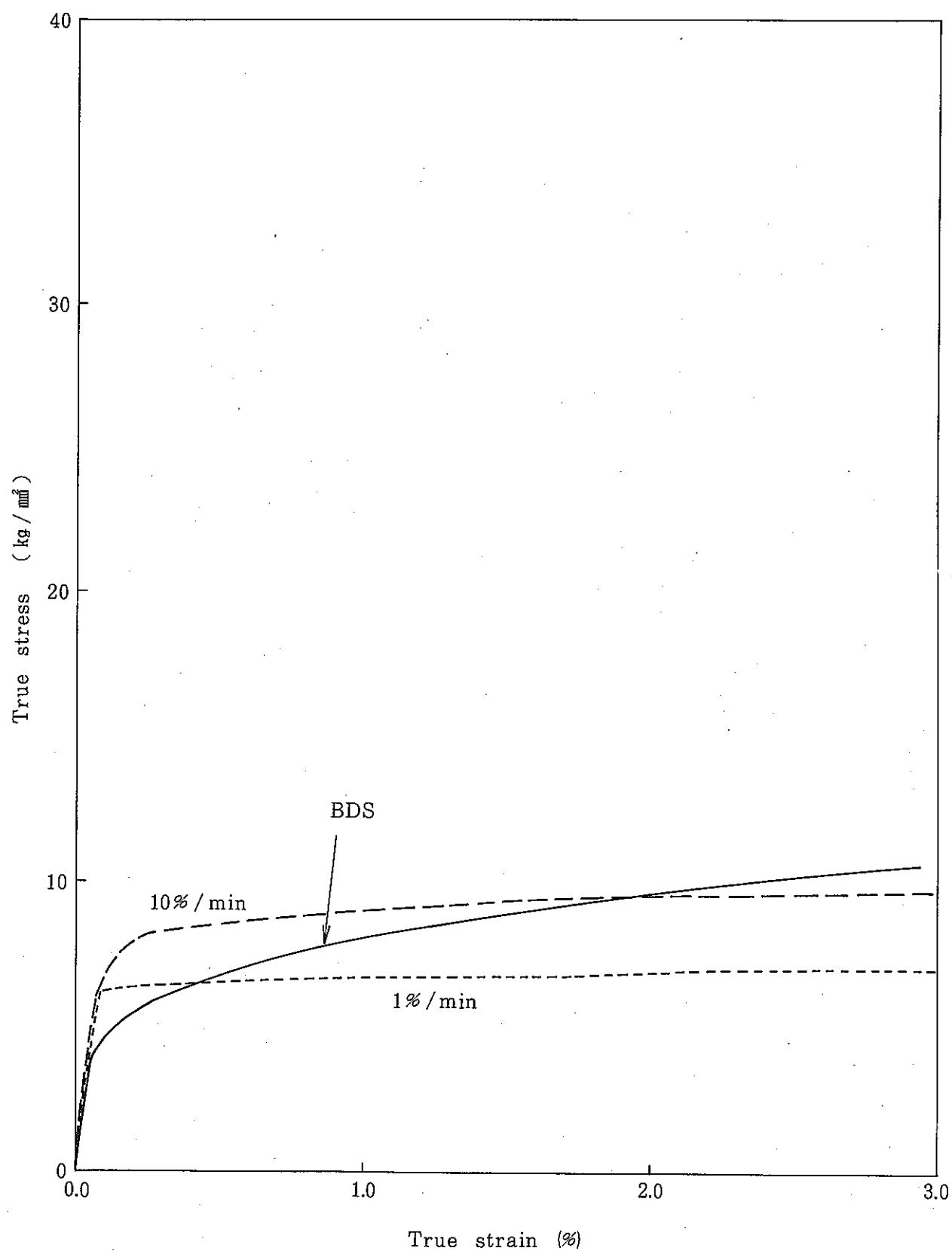


Fig.13 True stress-true strain curves of SUS 304 steel plate at 900°C.

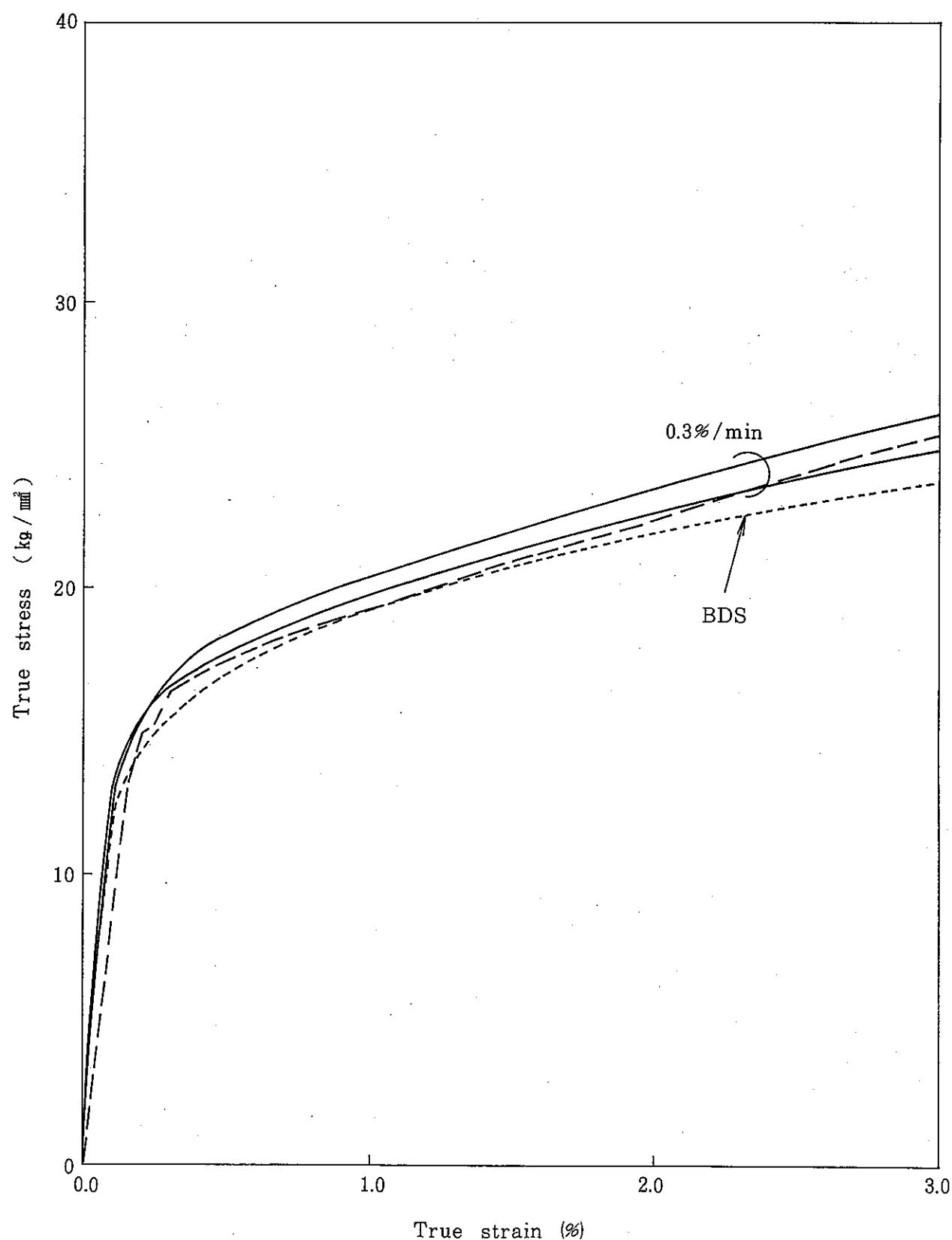


Fig.14 True stress-true strain curves of SUS321 steel plate at 550°C.

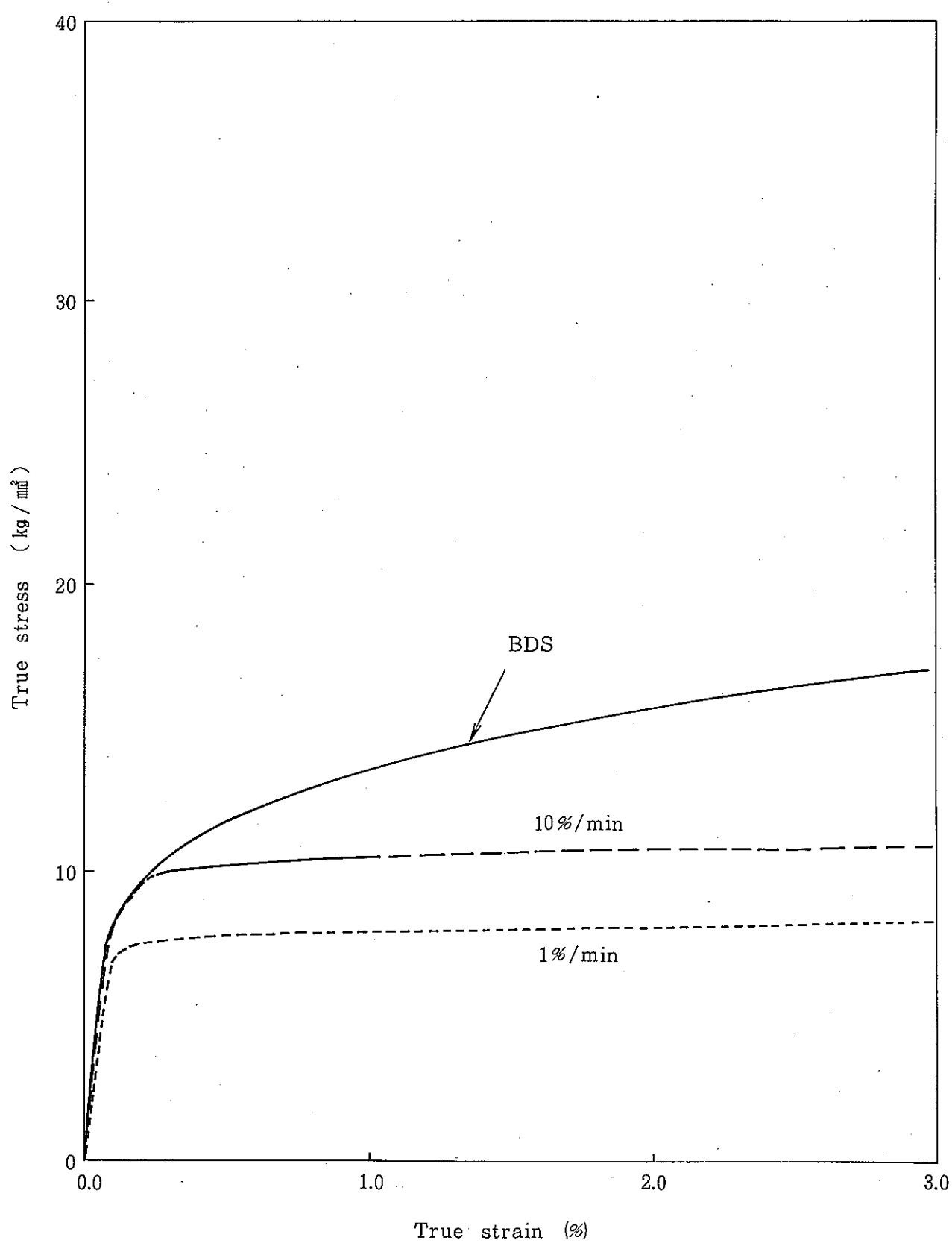


Fig.15 True stress-true strain curves of SUS321 steel plate at 900°C.

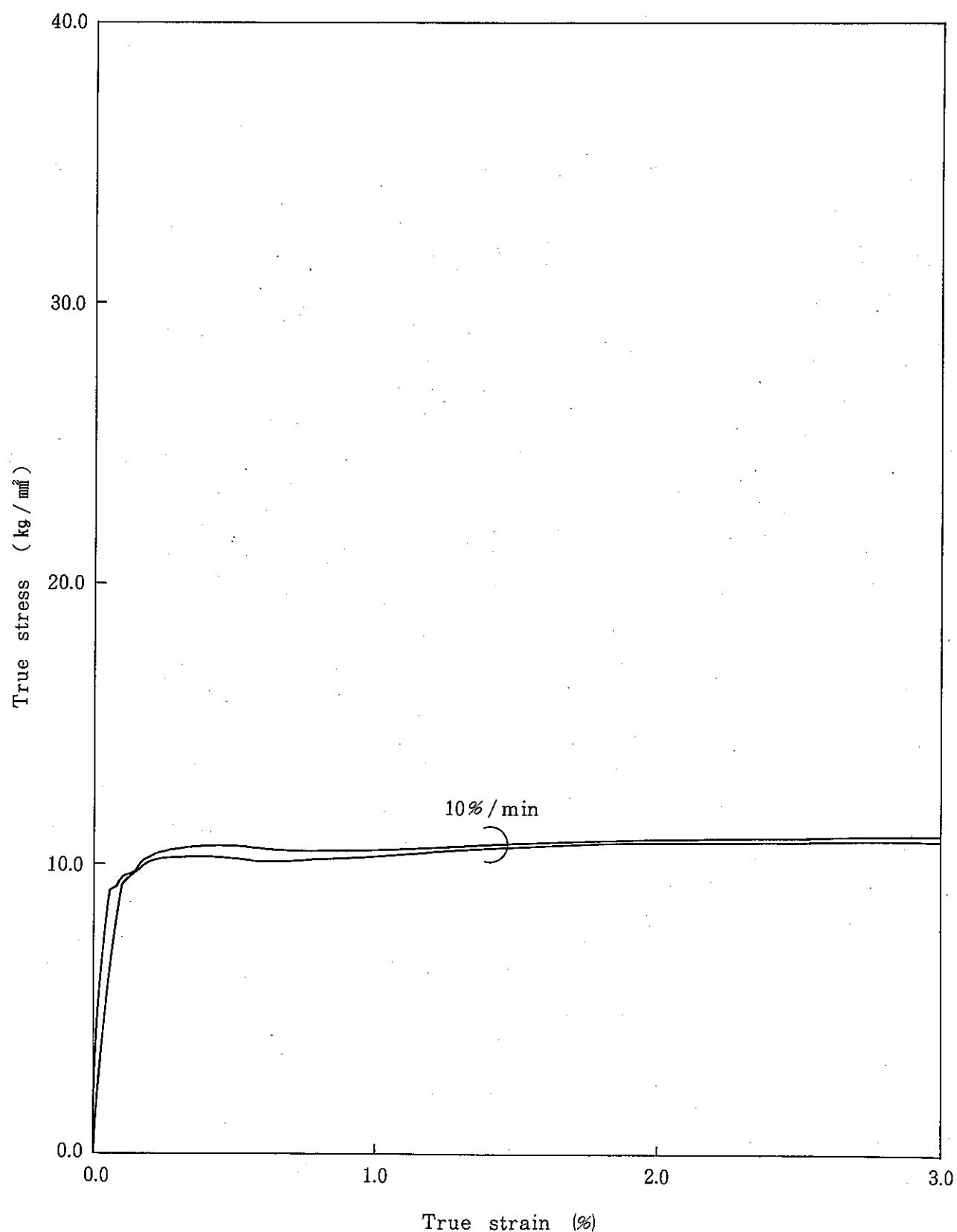


Fig.16 True stress-true strain curves of SUS 321 steel forging at 900°C.

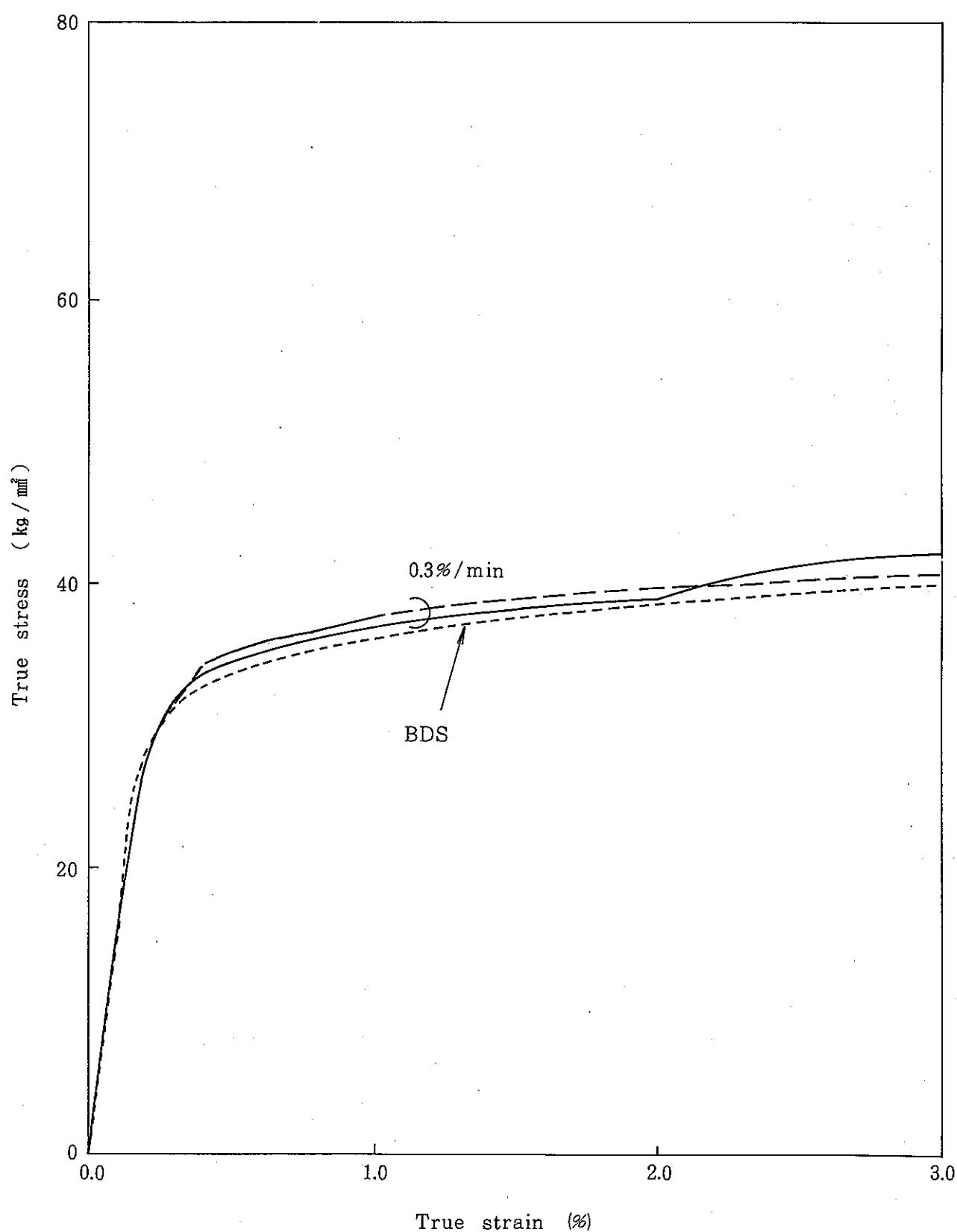


Fig.17 True stress-true strain curves of 2 1/4 Cr-1 Mo steel plate
at 500°C.

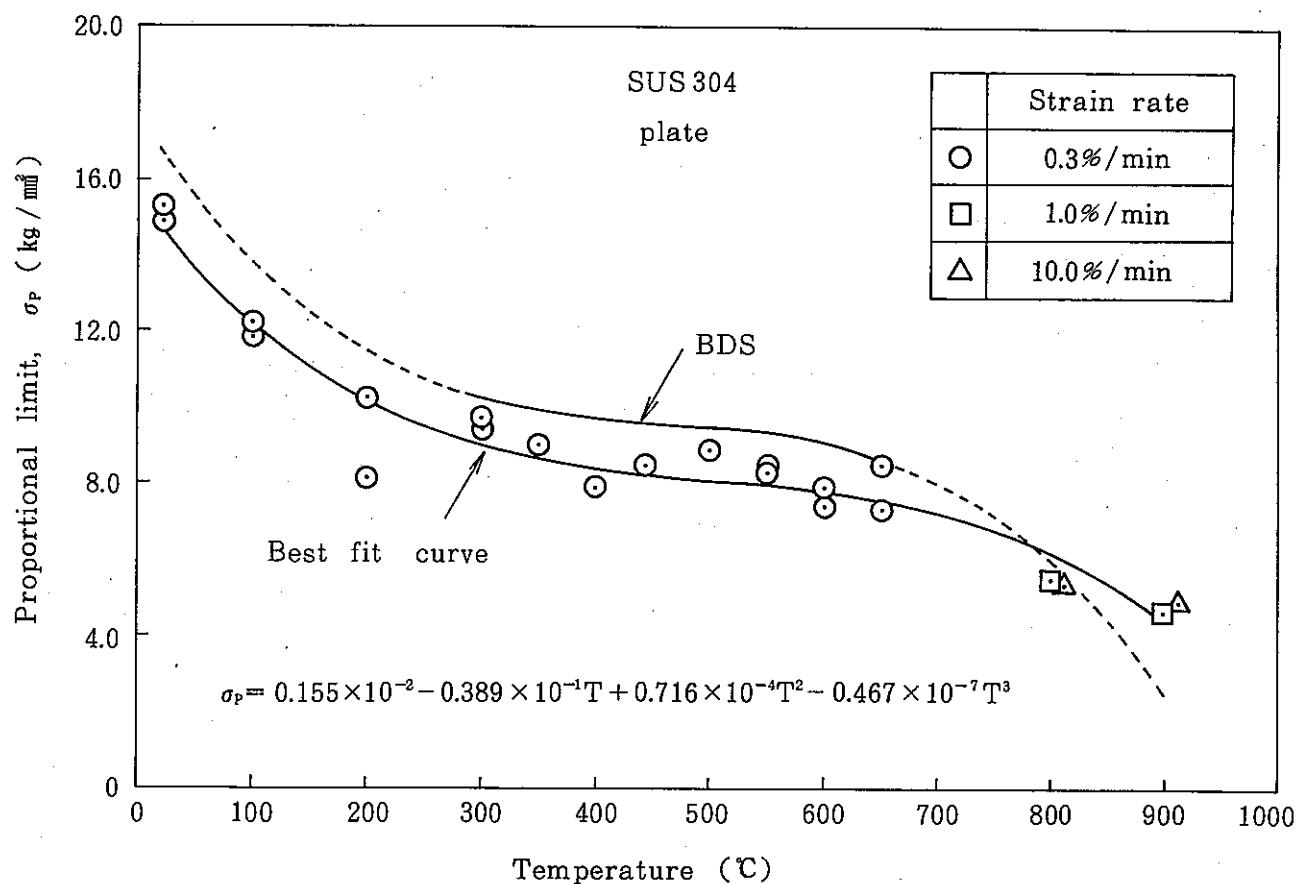


Fig.18 Proportional limit of SUS 304 steel plate.

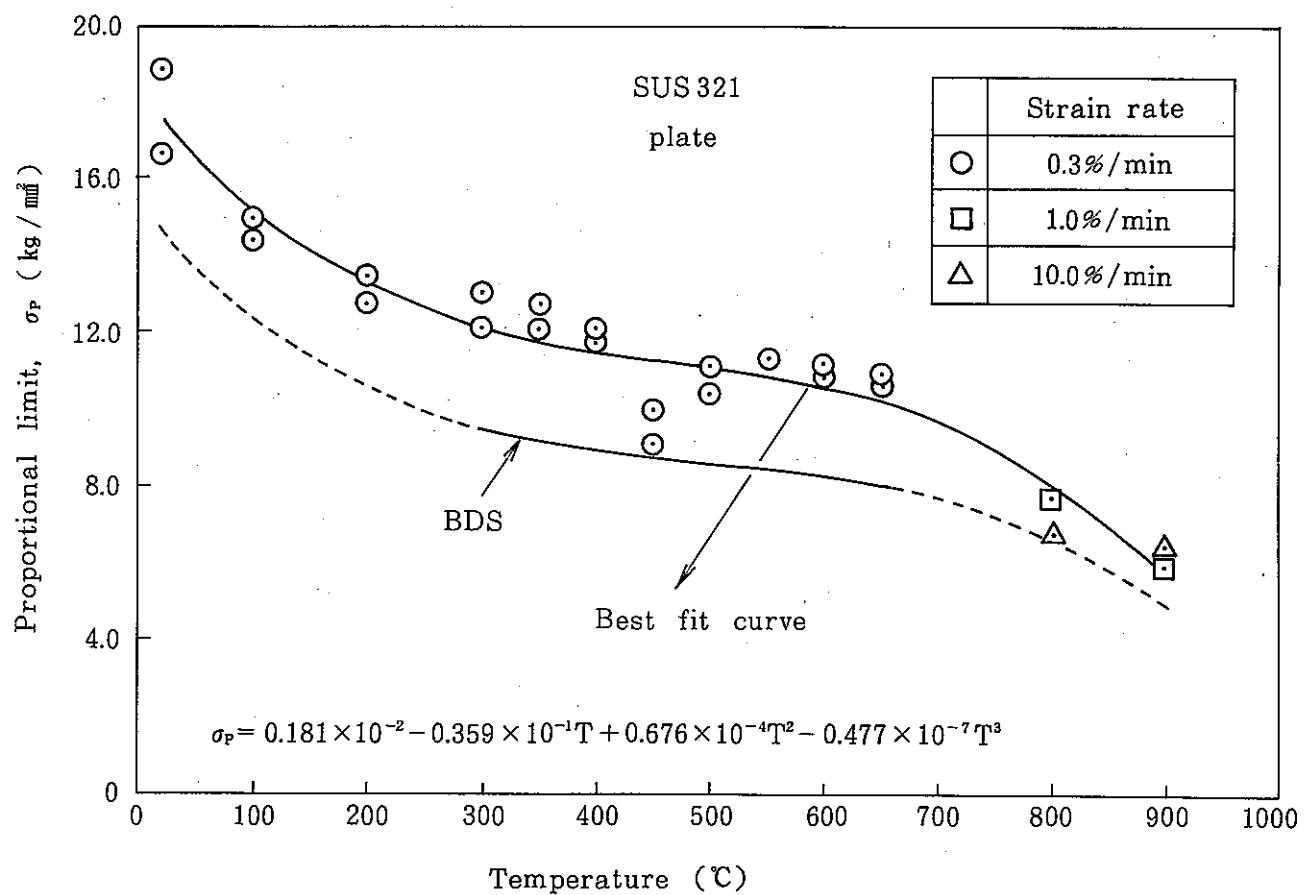


Fig.19 Proportional limit of SUS 321 steel plate.

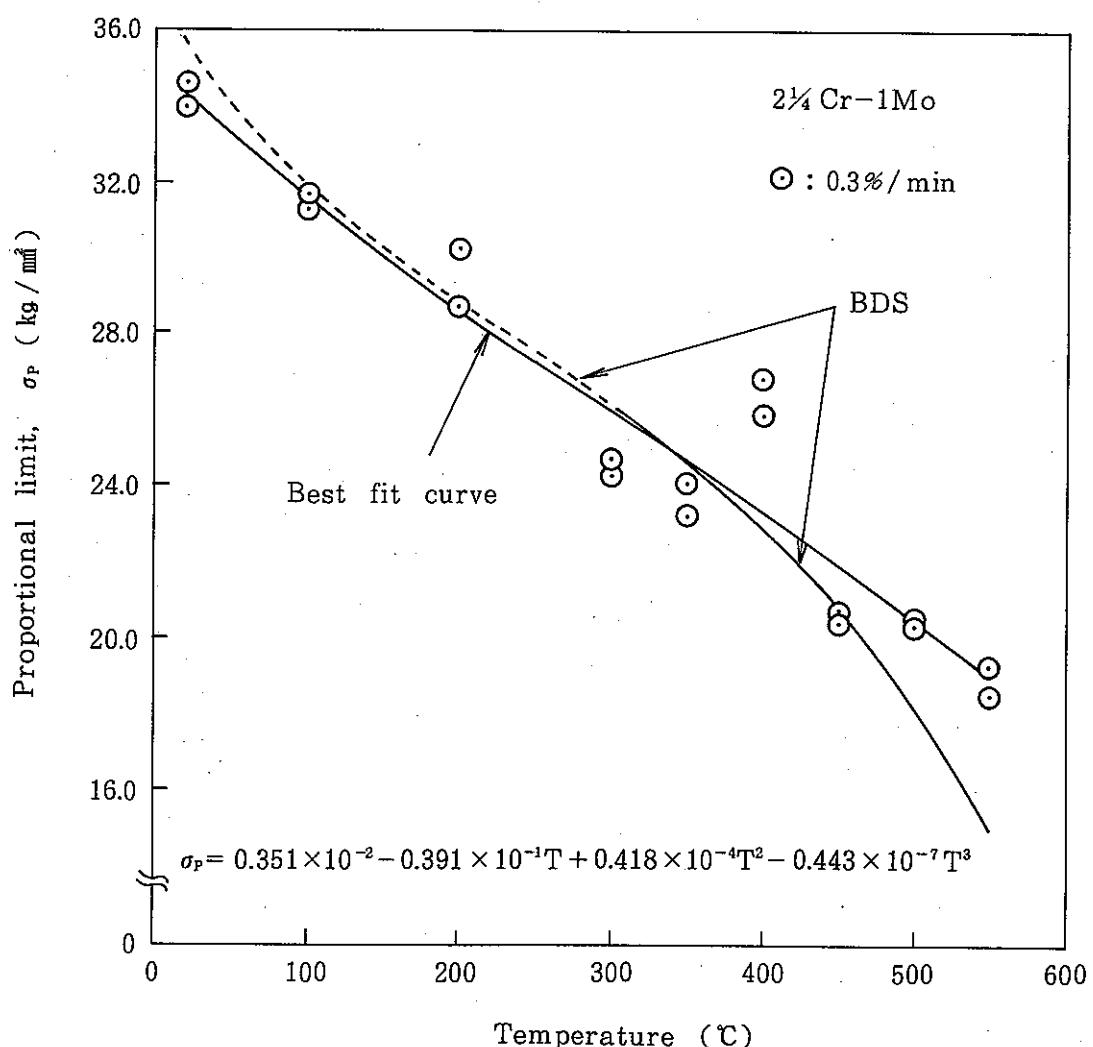


Fig.20 Proportional limit of 2 1/4 Cr-1 Mo steel plate.

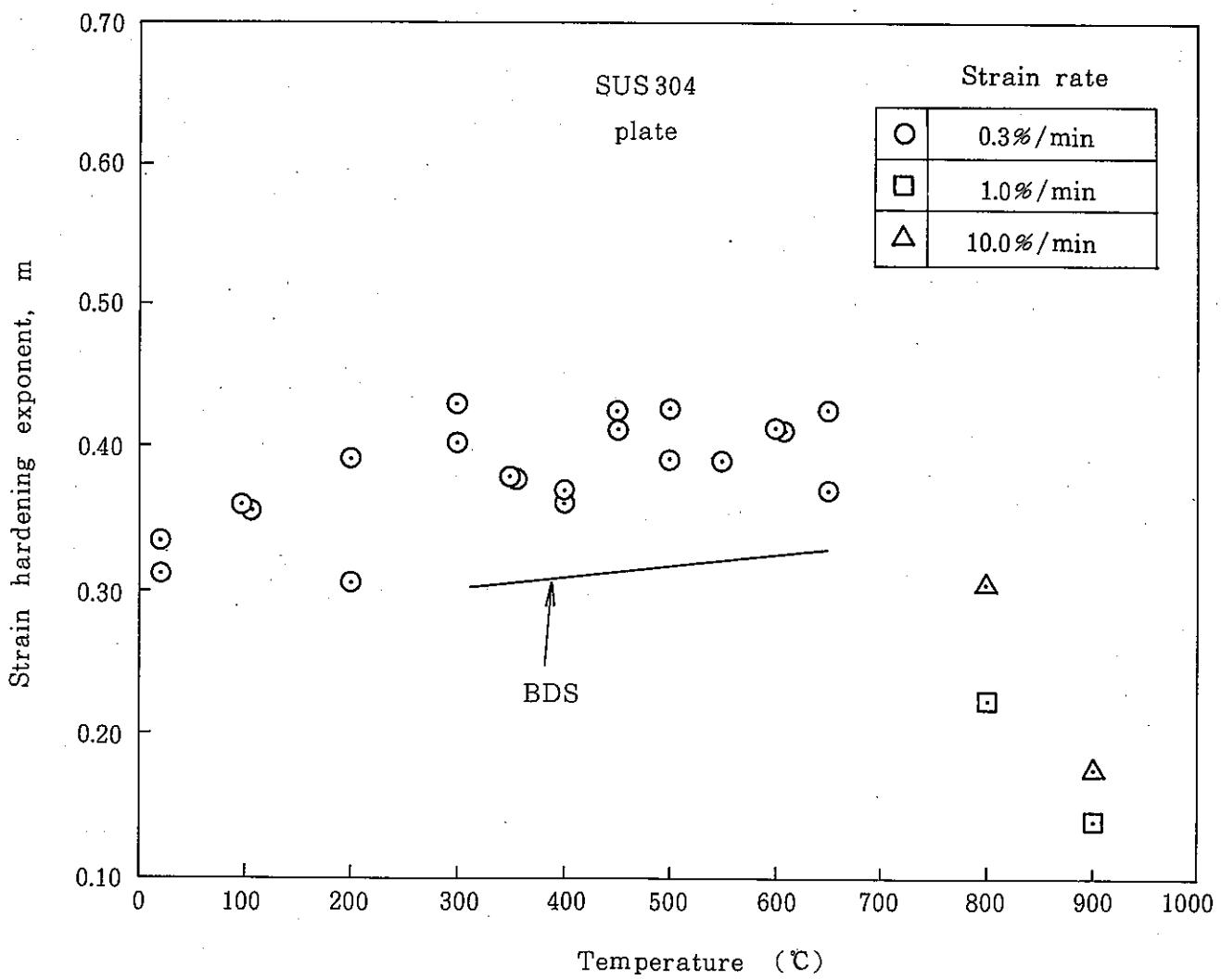


Fig.21 Strain hardening exponent of SUS 304 steel plate.

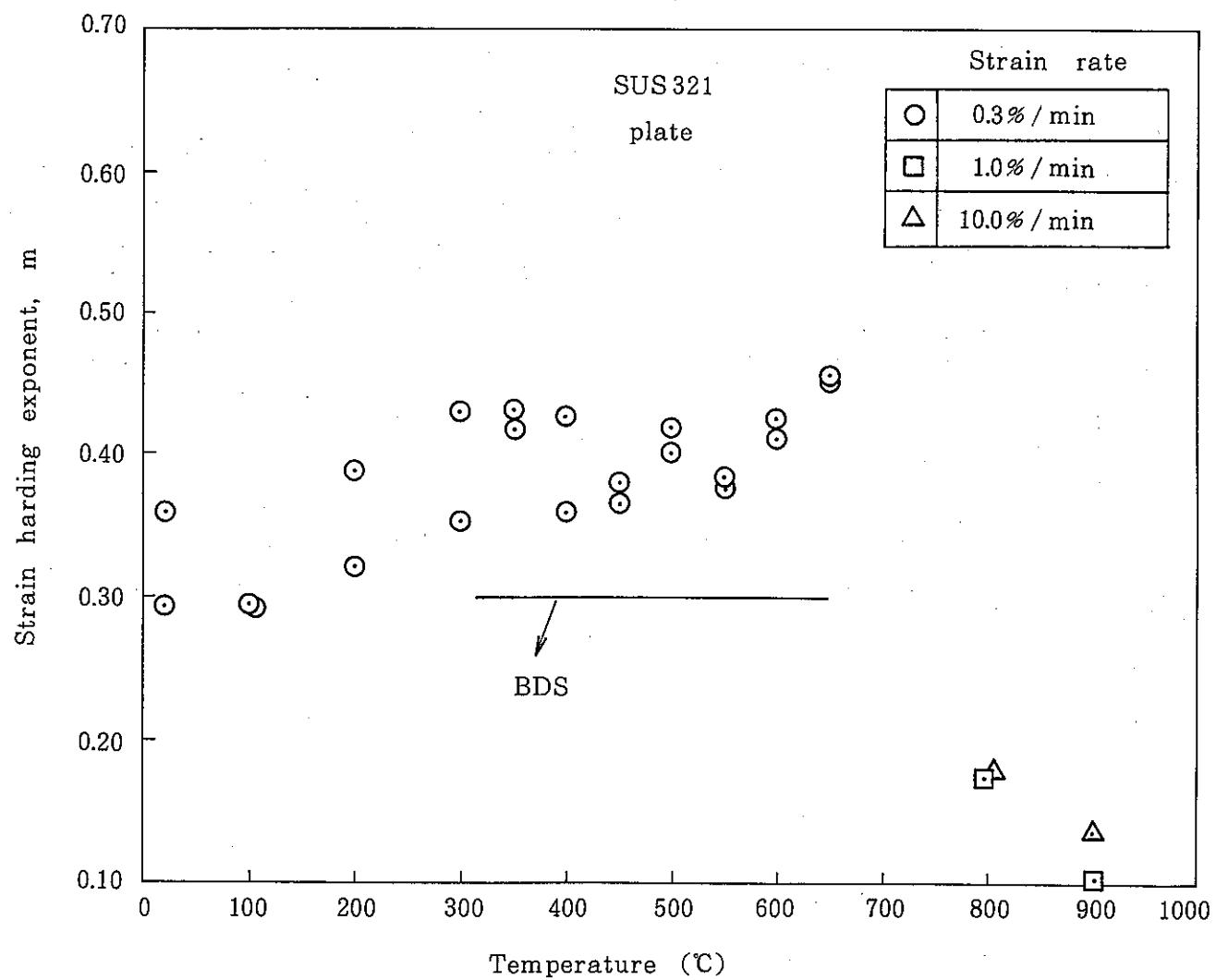
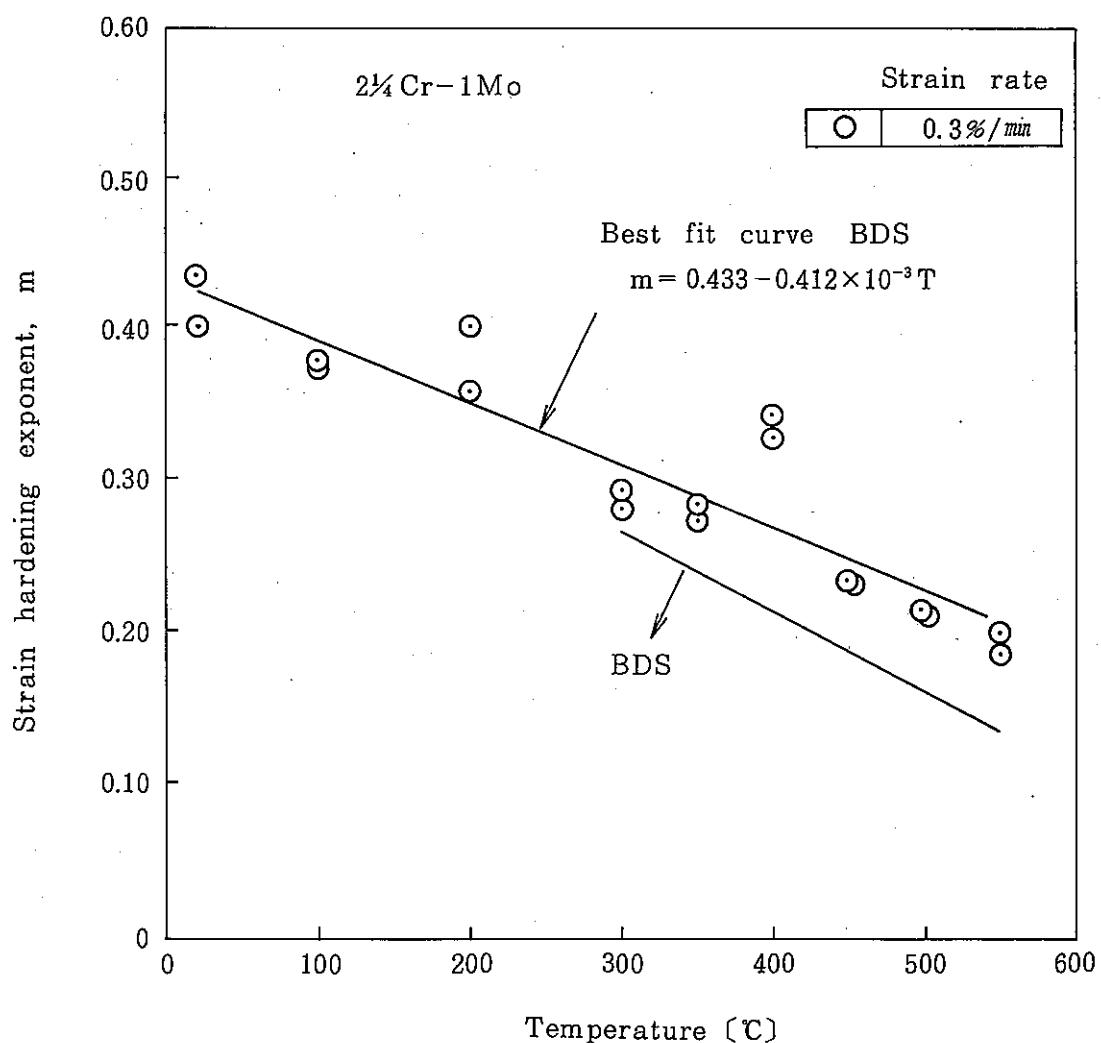


Fig.22 Strain hardening exponent of SUS 321 steel plate.

Fig.23 Strain hardening exponent of $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ steel plate.

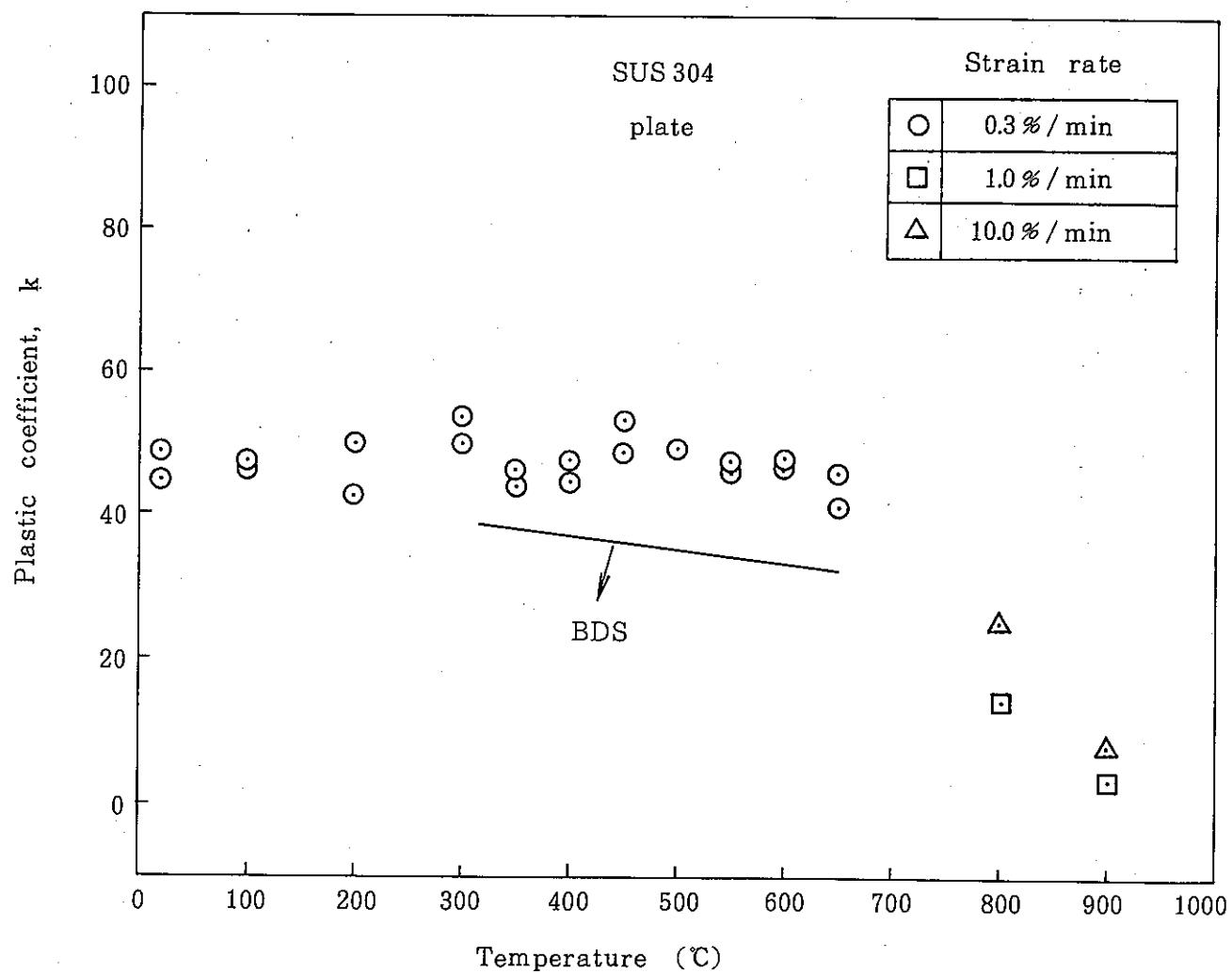


Fig.24 Plastic coefficient of SUS 304 steel plate.

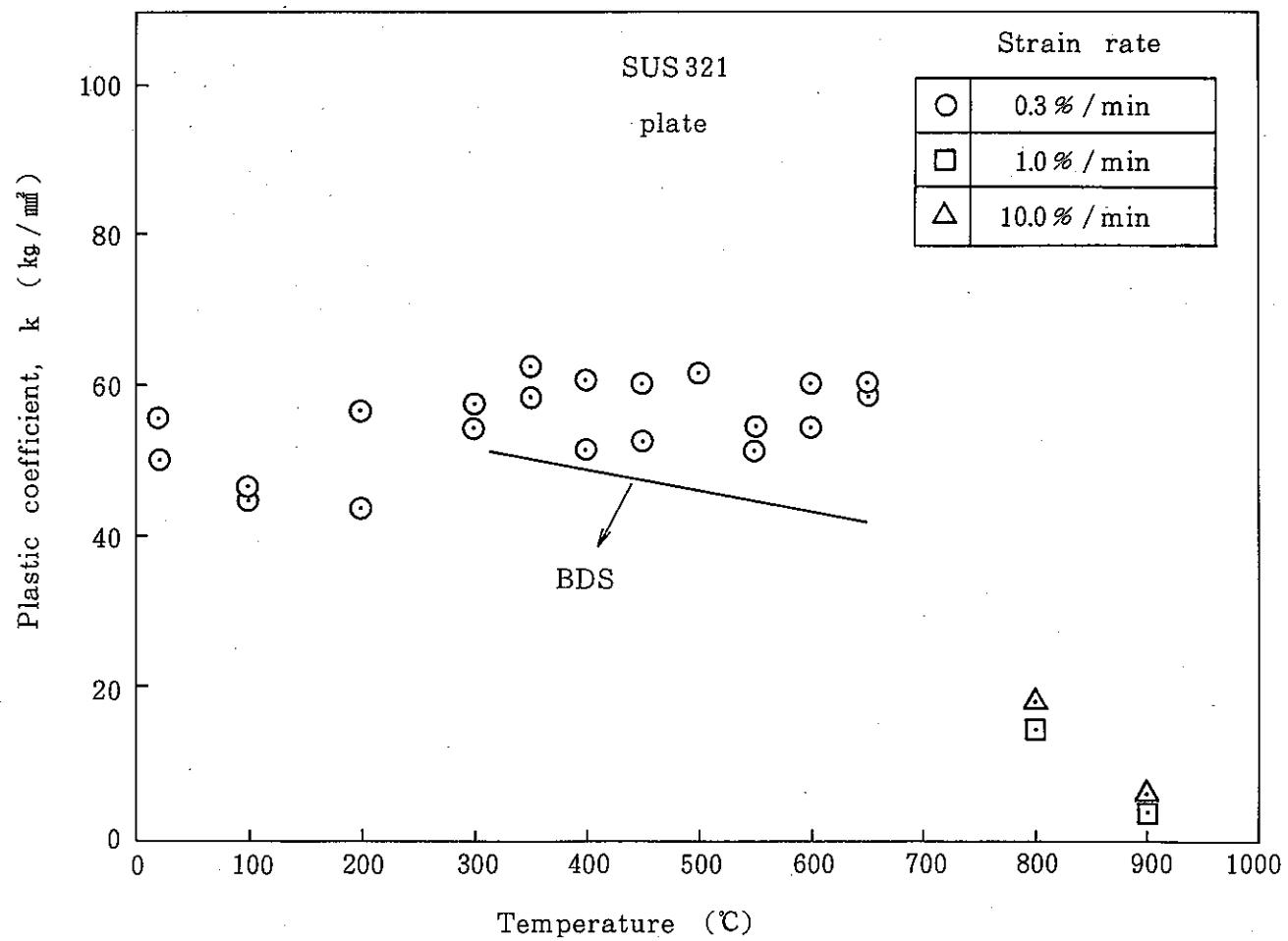


Fig.25 Plastic coefficient of SUS 321 steel plate.

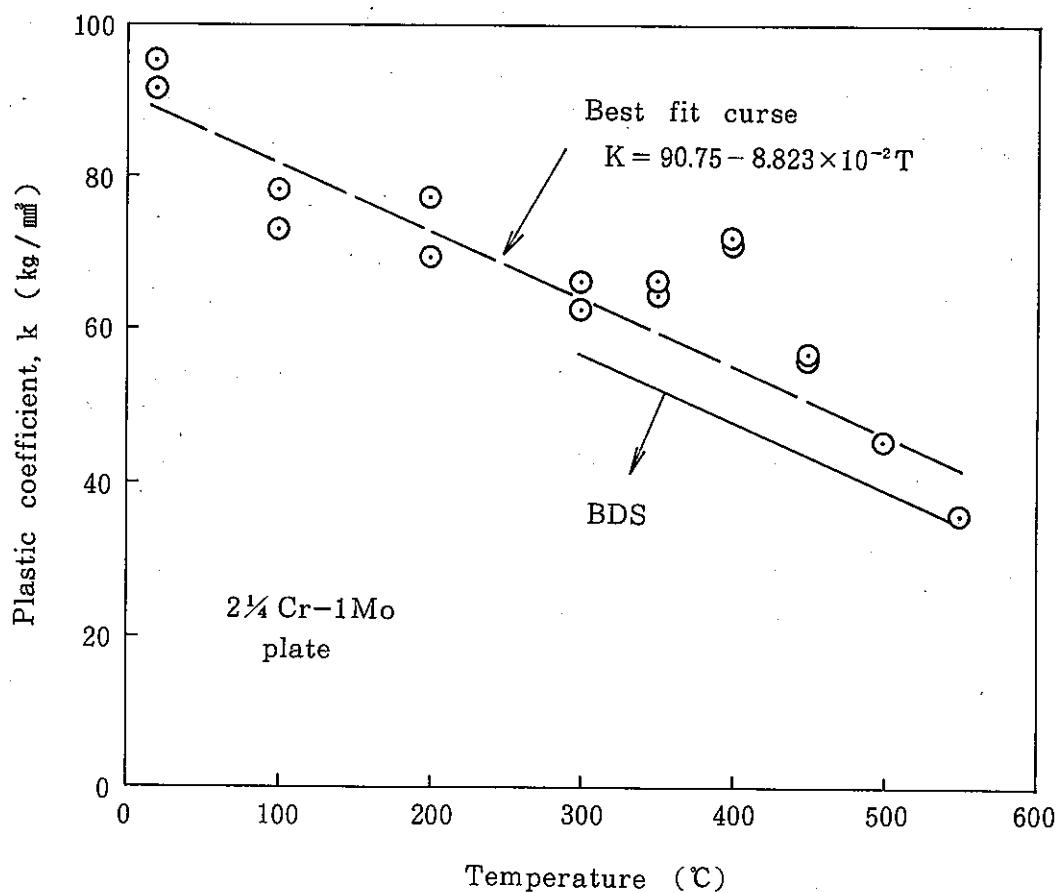


Fig.26 Plastic coecccient of 2 1/4 Cr-1Mo steel plate.

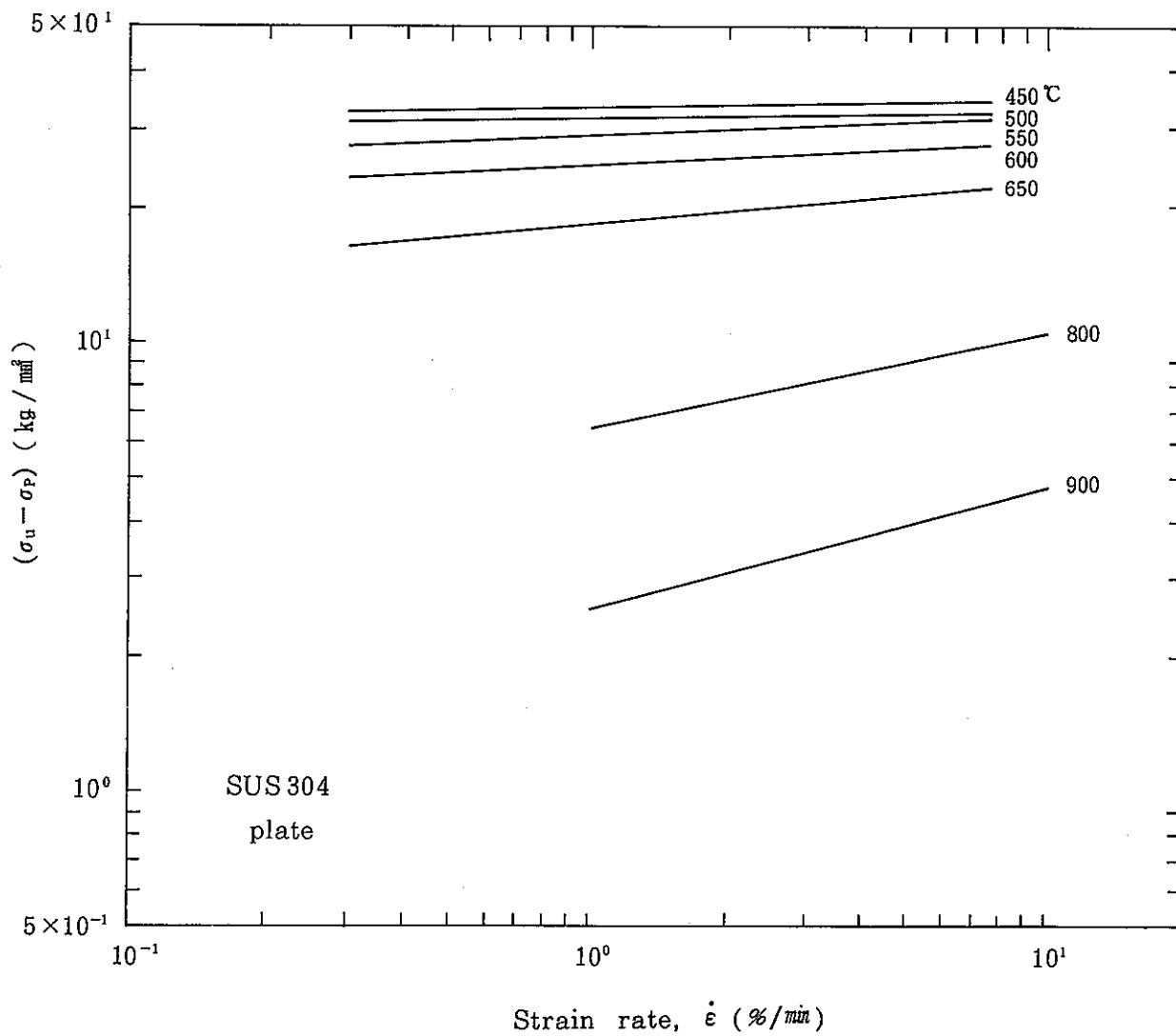


Fig. 27 Strain rate dependence of $(\sigma_u - \sigma_p)$ in SUS 304 steel plate.

- 44 -

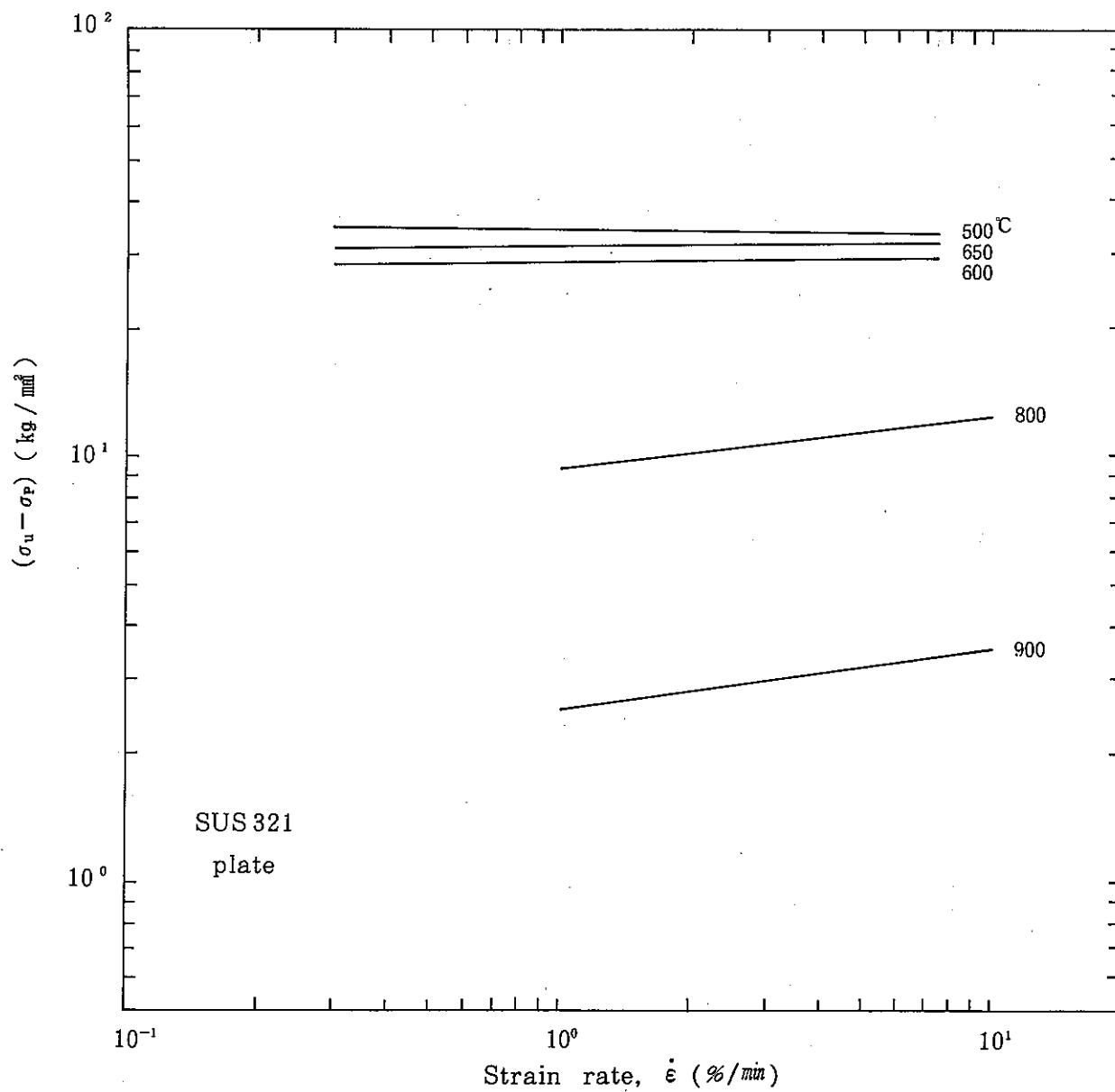


Fig. 28 Strain rate dependence of $(\sigma_u - \sigma_p)$ in SUS 321 steel plate.

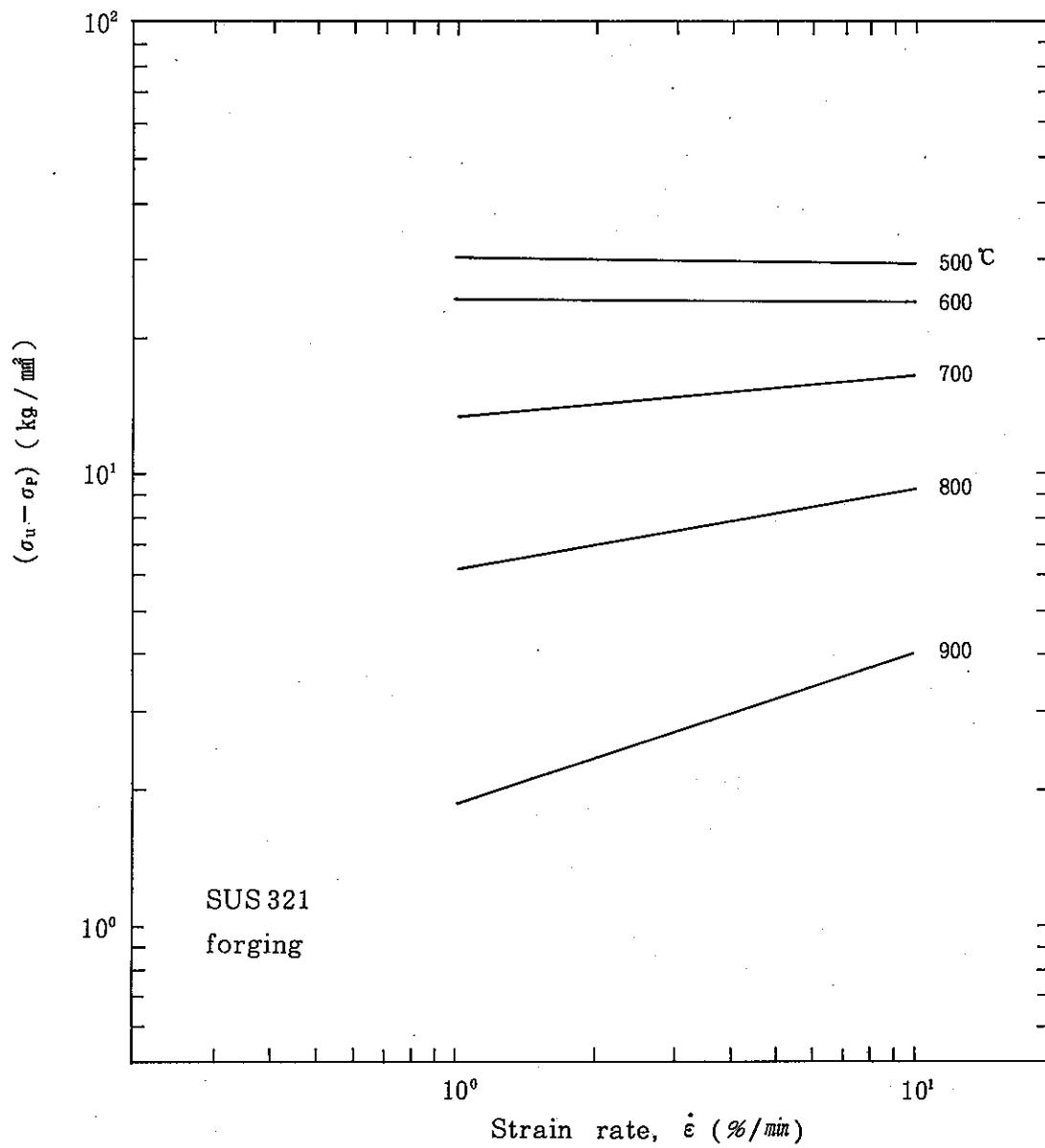


Fig.29 Strain rate dependence of $(\sigma_u - \sigma_p)$ in SUS 321 steel forging.

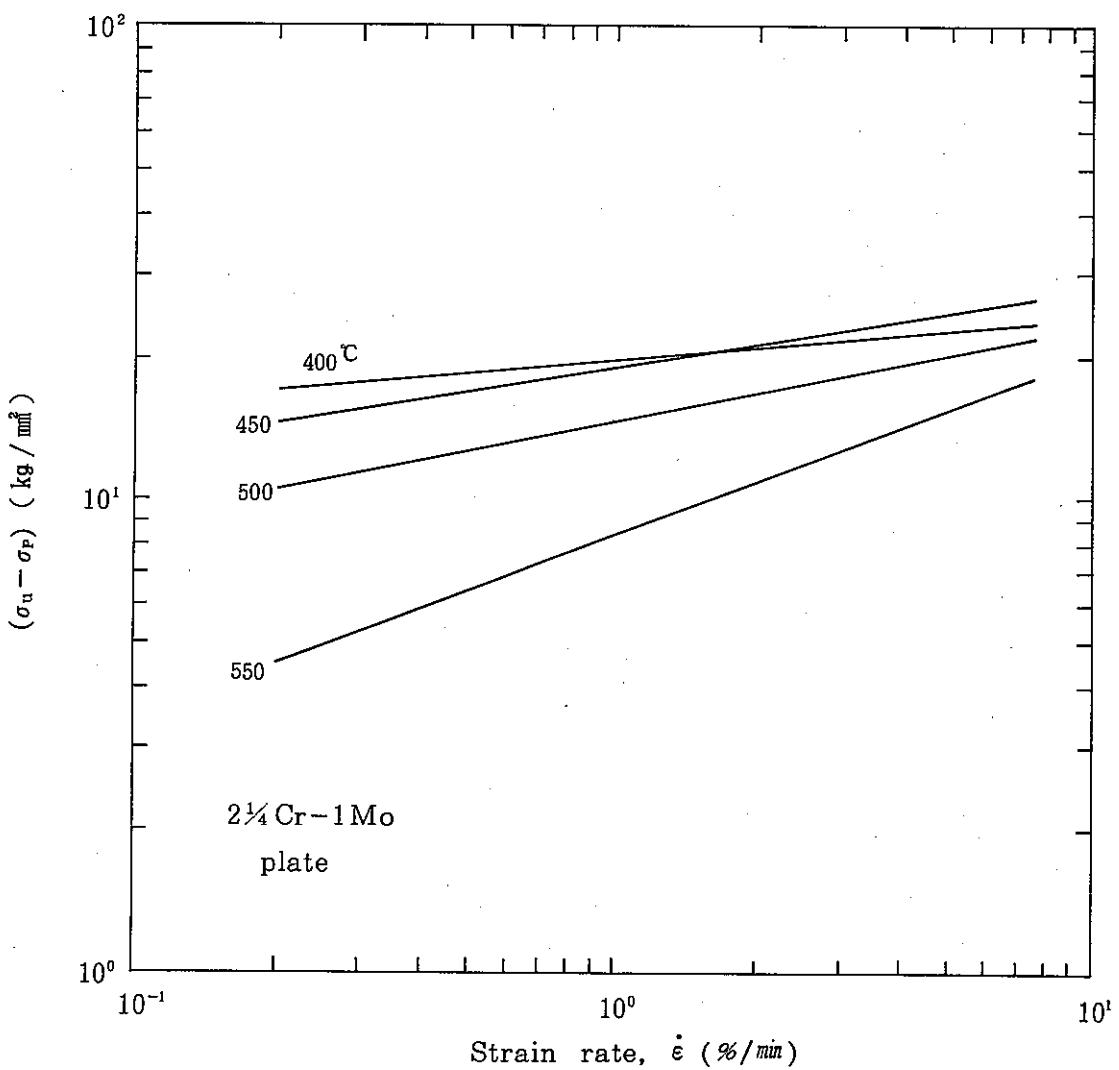


Fig.30 Strain rate dependence of $(\sigma_u - \sigma_p)$ in $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ steel plate.

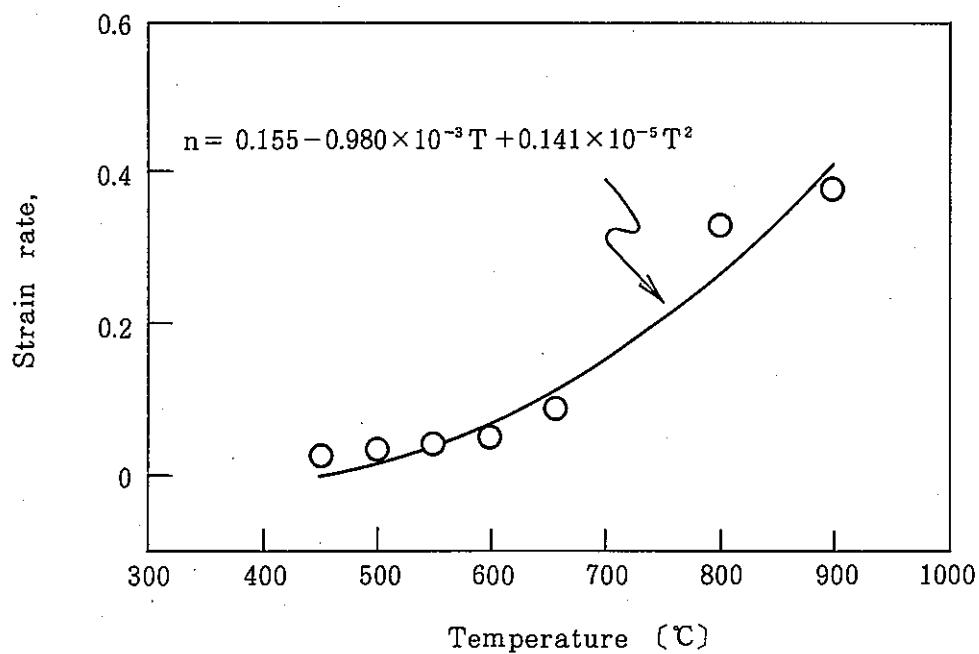


Fig.31 Temperature dependence of exponent n in SUS 304 steel.

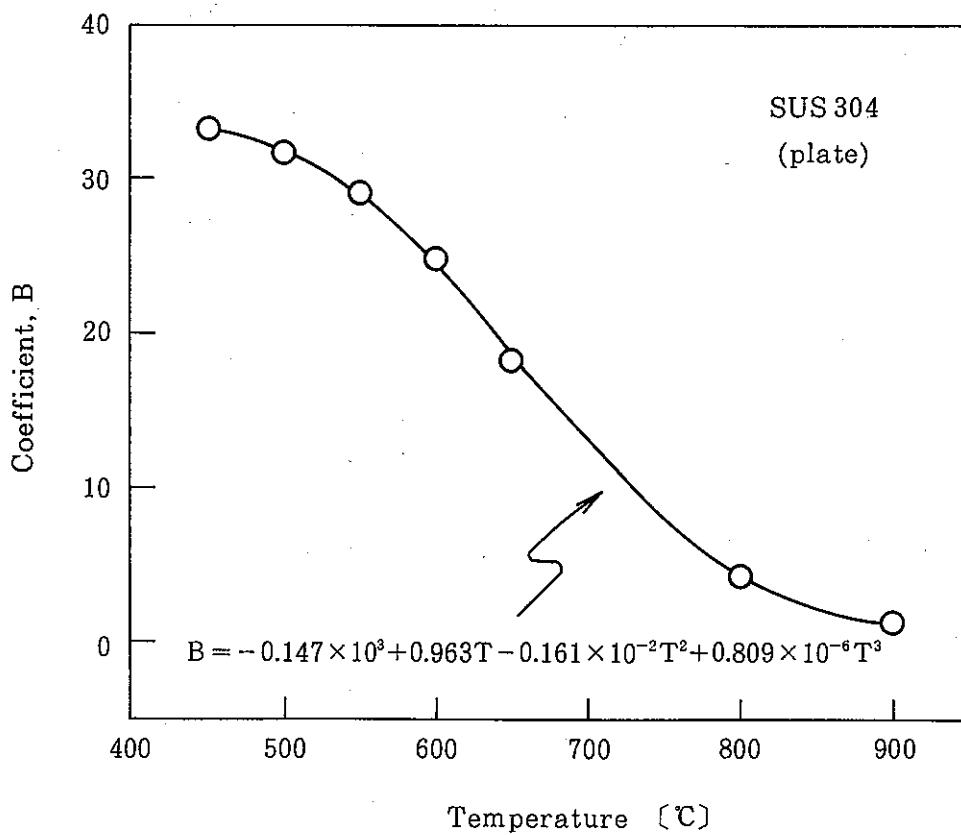


Fig.32 Temperature dependence of coefficient B in SUS 304 steel.

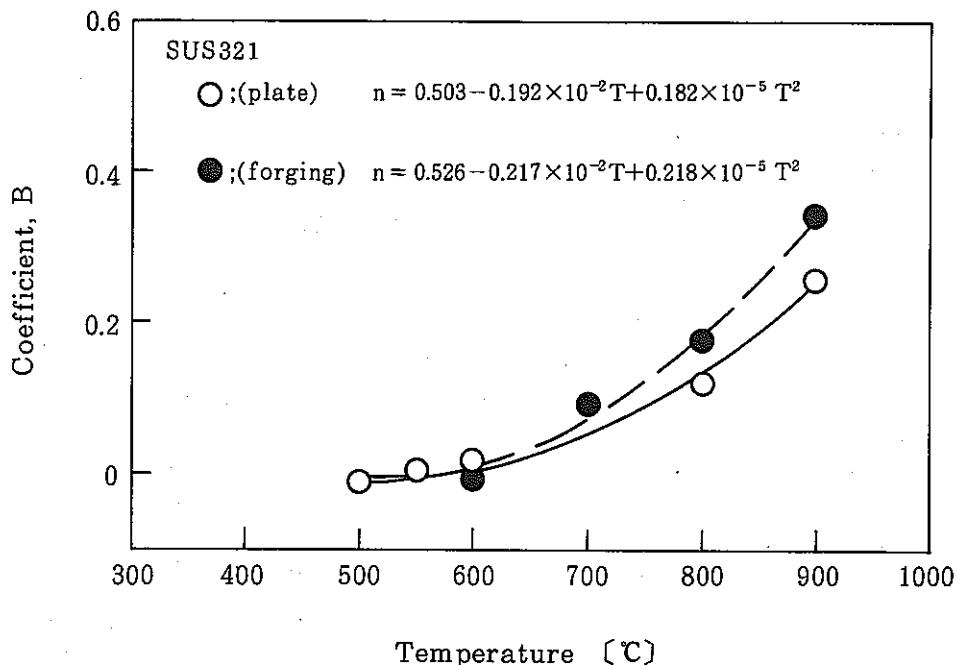


Fig.33 Temperature dependence of exponent n in SUS321 steel.

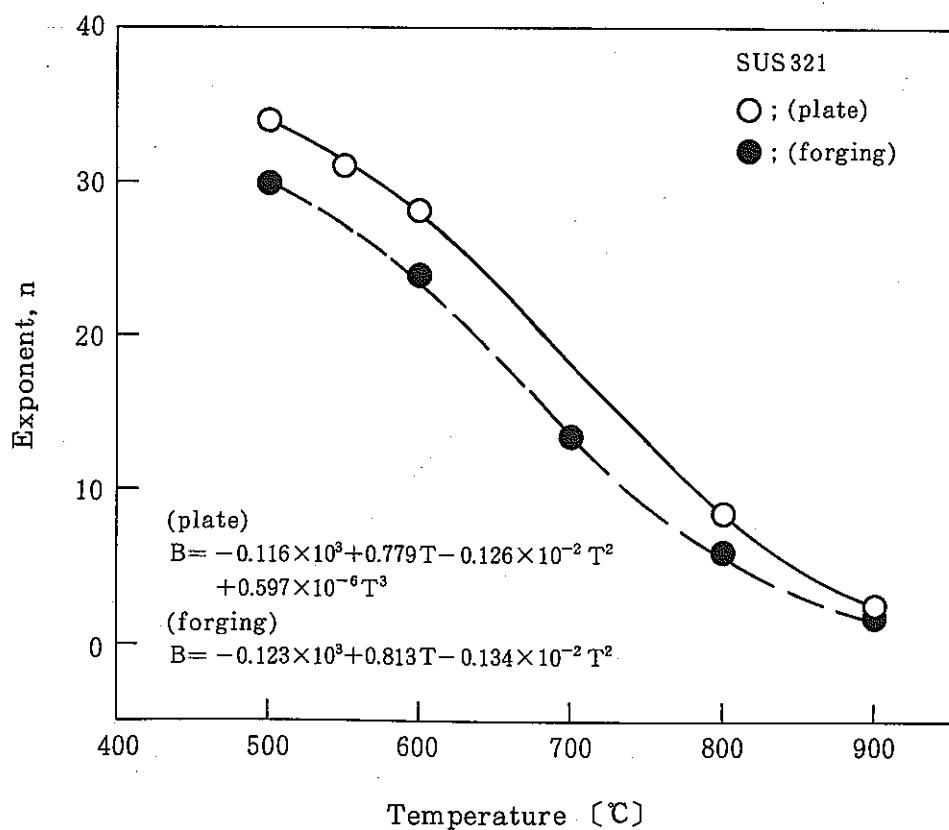


Fig.34 Temperature dependence of coefficient B in SUS321 steel.

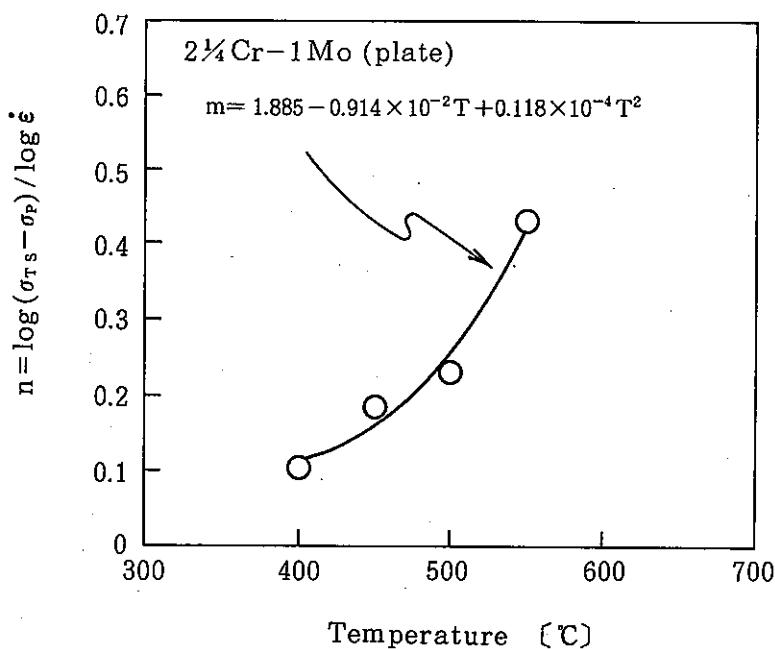


Fig.35 Temperature dependence of exponent n in 2 1/4-1Mo steel.

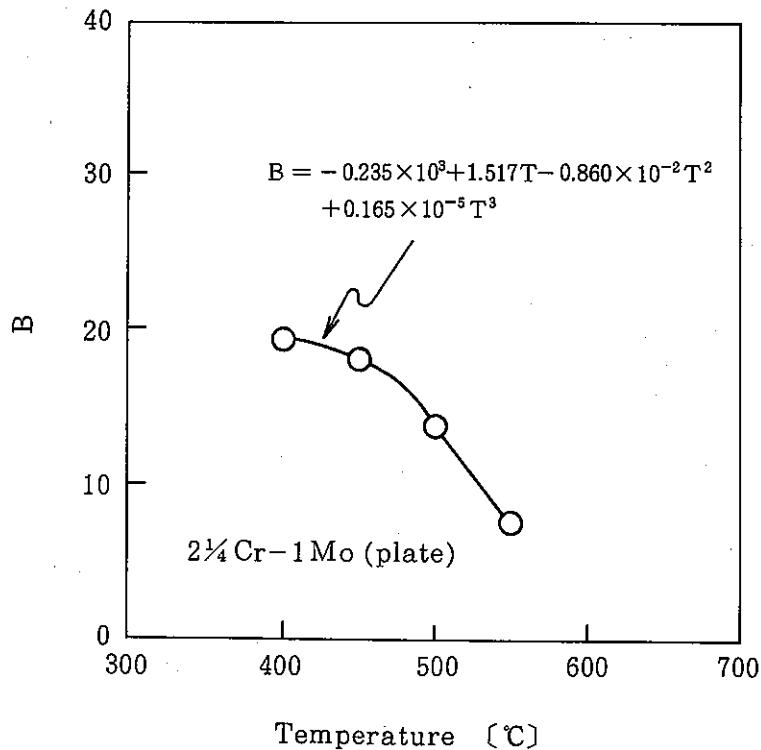


Fig.36 Temperature dependence of coefficient B in 2 1/4-1Mo steel.

Table 7 Calculated tensile strength at strain rate of 7.5%/min
(JIS strain rate).

STEEL	TEMP.	σ_B
SUS 304 (plate)	700	25.7
	800	13.5
	900	7.8
SUS 321 (plate)	700	30.1
	800	19.7
	900	10.1
SUS 321 (forged)	500	40.4
	600	34.9
	700	26.5
	800	16.8
	900	10.3

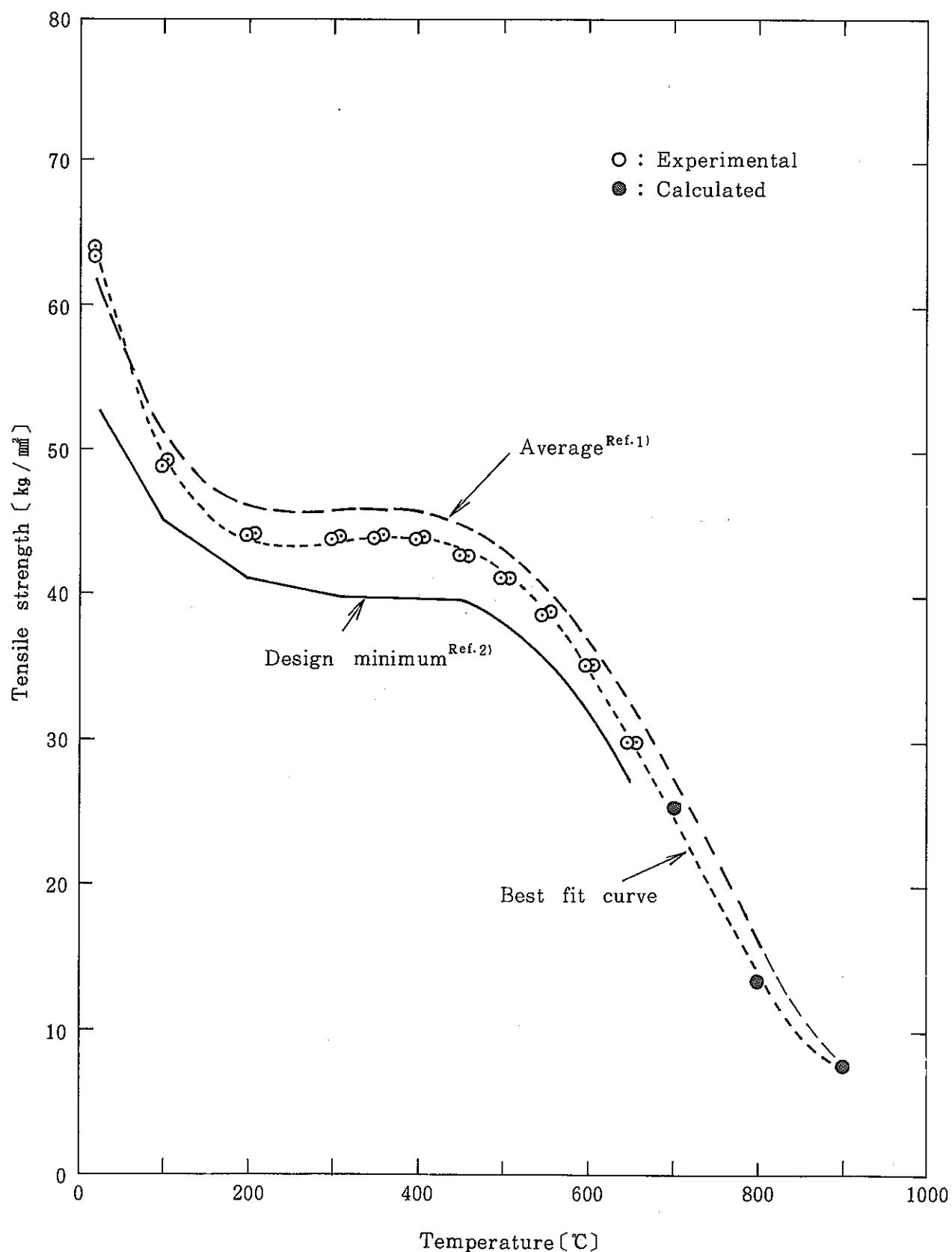


Fig.37 Temperature dependence of tensile strength in SUS 304 steel plate at strain rate of 7.5%/min.

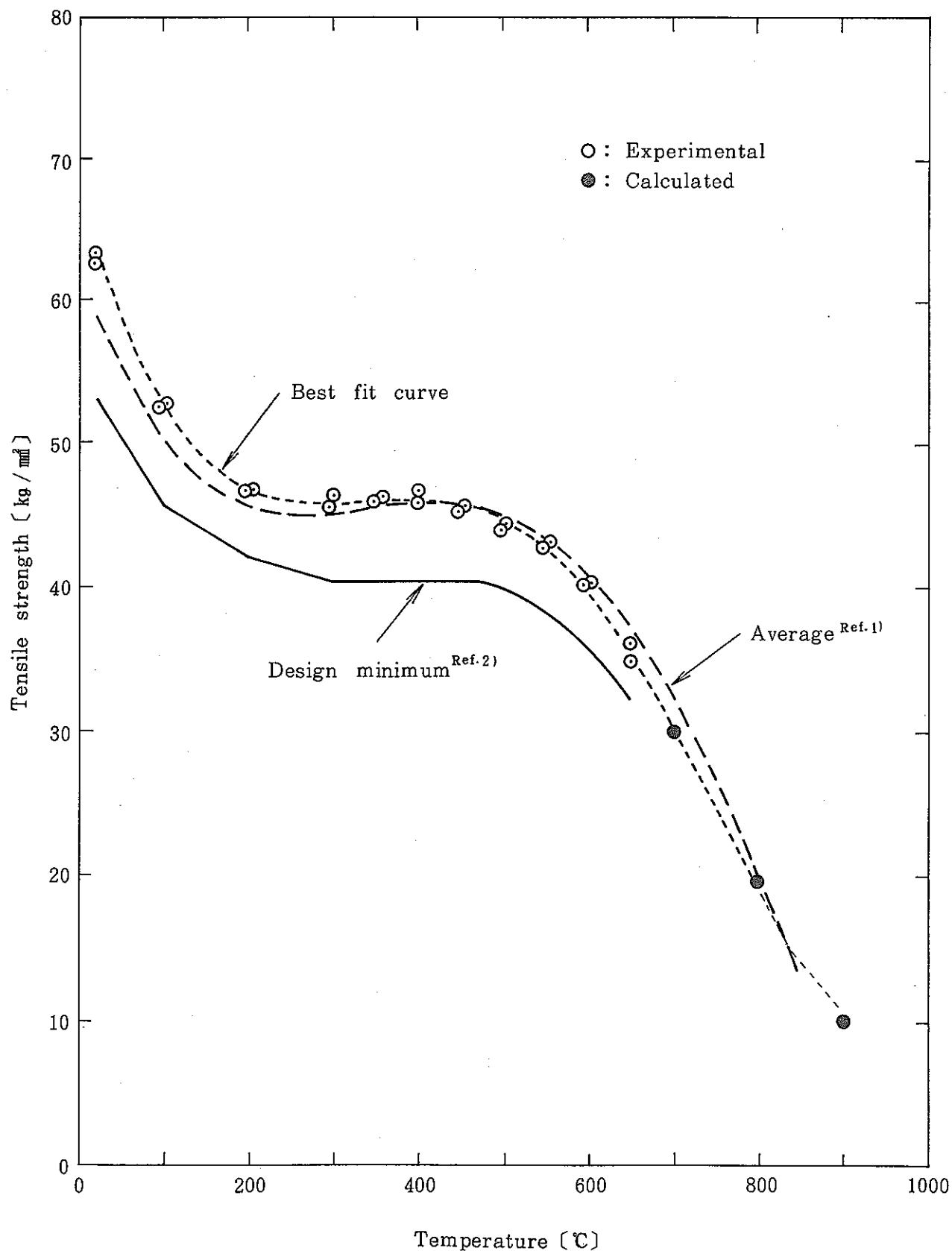


Fig.38 Temperature dependence of tensile strength in SUS 321 steel plate at strain rate of 7.5%/min.

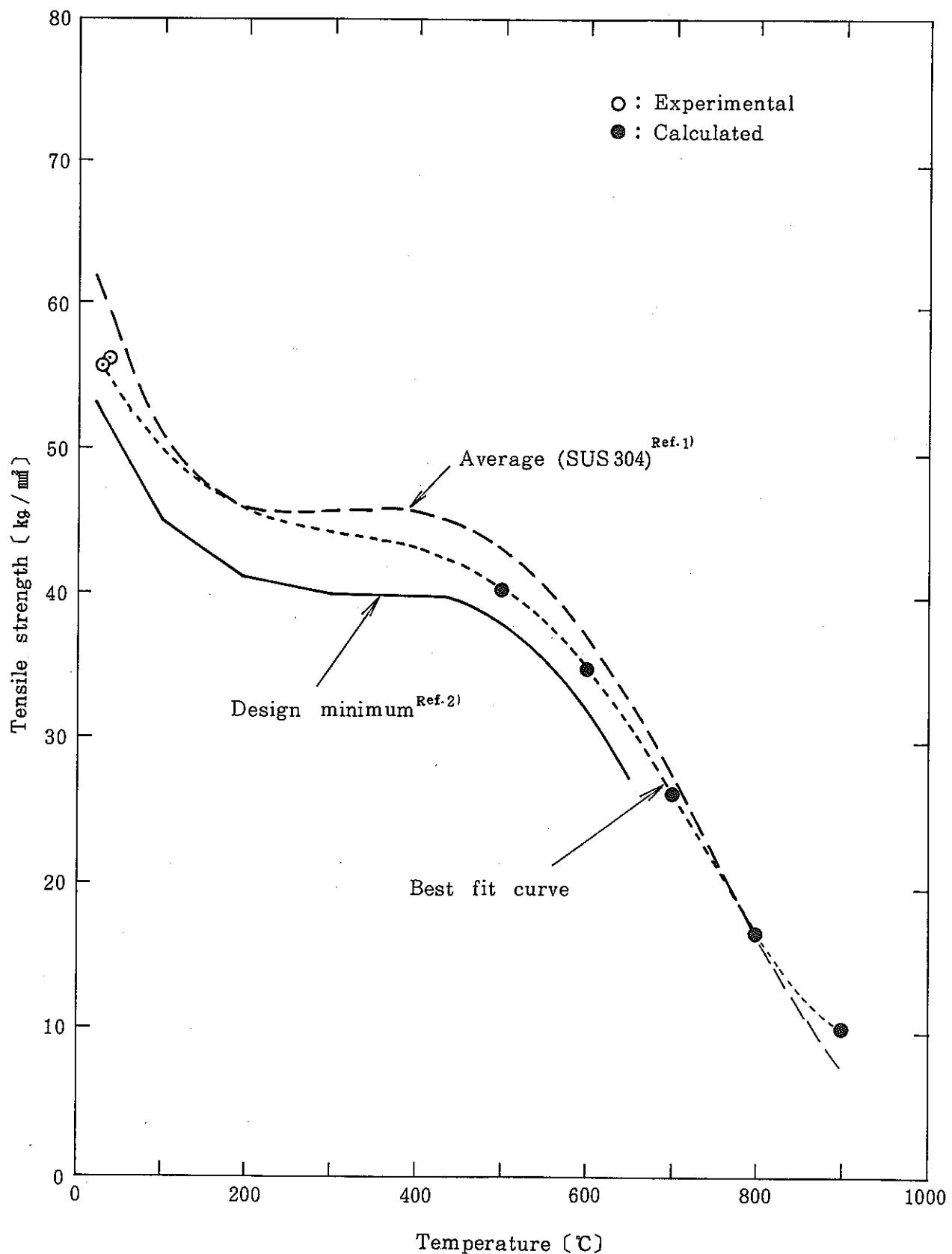


Fig.39 Temperature dependence of tensile strength in SUS 321 steel forging at strain rate of 7.5%/min.

Table 8 Least square fitting curves for tensile strength up to 900°C.

STEEL	$R \leq T \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$	
SUS 304 (plate)	$0.179 \times 10^1 - 0.4479 \times 10^{-2}T + 0.1735 \times 10^{-4}T^2 - 0.2631 \times 10^{-7}T^3 + 0.1192 \times 10^{-10}T^4 + 0.6396 \times 10^{-15}T^5$	63.60
SUS 321 (plate)	$R \leq T \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ $0.1058 \times 10^1 - 0.3056 \times 10^{-2}T + 0.9024 \times 10^{-5}T^2 - 0.6992 \times 10^{-8}T^3 - 0.6992 \times 10^{-8}T^4 - 0.6634 \times 10^{-11}T^4 + 0.6764 \times 10^{-14}T^5$	62.95
SUS 321 (torging)	$500 \leq T \leq 900 \text{ }^\circ\text{C}$ $0.1035 \times 10^1 - 0.1849 \times 10^{-2}T + 0.4301 \times 10^{-5}T^2 - 0.6260 \times 10^{-10}T^3 - 0.1137 \times 10^{-10}T^4 + 0.8183 \times 10^{-14}T^5$	55.90

付 錄

TableA1 Tensile test results of SUS321 steel (forged).

Specimen No.	Test Temp (°C)	0.2%P.S. (kg/mm ²)	U.T.S. (kg/mm ²)	F.E (%)	R.A. (%)	U.E. (%)	Strain rate (%/min)
EB127	19	21.8	63.3	72.3	80.3	61.9	0.3 / 7.5
EB128	19	21.8	63.9	71.5	81.3	61.3	0.3 / 7.5
EB129	100	17.6	49.2	65.2	83.7	53.3	0.3 / 7.5
EB130	100	17.5	48.7	64.7	84.2	52.8	0.3 / 7.5
EB131	200	15.1	44.2	51.6	78.4	40.0	0.3 / 7.5
EB132	200	14.9	44.0	52.1	82.9	40.7	0.3 / 7.5
EB133	300	13.9	44.1	47.6	76.5	38.3	0.3 / 7.5
EB134	300	13.7	43.7	49.2	76.0	40.1	0.3 / 7.5
EB137	350	13.8	44.2	46.7	75.9	37.8	0.3 / 7.5
EB139	350	13.6	43.9	46.6	76.1	37.6	0.3 / 7.5
EB135	400	13.1	43.8	48.0	75.9	38.8	0.3 / 7.5
EB136	400	13.1	43.9	48.4	73.4	39.9	0.3 / 7.5
EB103	450	12.7	42.8	47.4	75.7	38.4	0.3 / 7.5
EB104	450	12.7	42.8	47.4	75.2	38.4	0.3 / 7.5
EB101	500	12.5	41.3	44.1	72.3	34.5	0.3 / 7.5
EB102	500	12.4	41.2	43.9	74.2	34.6	0.3 / 7.5
EB105	550	11.9	38.7	44.1	76.6	34.0	0.3 / 7.5
EB106	550	11.7	39.0	45.2	74.7	32.7	0.3 / 7.5
EB107	600	11.5	35.2	45.4	76.7	32.4	0.3 / 7.5
EB109	600	12.0	35.1	46.1	75.7	33.2	0.3 / 7.5
EB110	650	12.1	30.0	49.3	67.6	30.2	0.3 / 7.5
EB111	650	11.8	29.9	46.9	67.4	26.9	0.3 / 7.5
EB114	700	10.9	20.8	67.8	62.0	24.5	1.0
EB115	700	11.1	21.3	64.4	61.1	23.6	1.0
EB120	700	10.4	25.2	57.0	65.1	26.1	10.0
EB121	700	9.74	25.0	61.1	64.9	29.1	10.0
EB117	800	9.26	12.1	80.2	69.3	18.4	1.0
EB126	800	9.20	12.0	92.9	68.5	17.3	1.0
EB122	800	9.01	15.8	80.6	67.9	17.8	10.0
EB123	800	9.77	16.0	79.4	69.1	17.5	10.0
EB119	900	5.85	6.78	81.5	71.7	19.5	1.0
EB113	900	6.43	7.09	80.7	71.2	20.0	1.0
EB124	900	8.07	9.83	93.7	79.6	13.7	10.0
EB125	900	7.96	9.67	93.4	83.5	14.9	10.0
EB141	450	12.8	44.2	47.7	74.5	38.1	0.3
EB201	500	12.0	41.6	47.1	73.2	37.0	0.3
EB202	550	11.5	36.1	35.9	61.0	27.2	0.3
EB205	600	11.6	32.5	50.0	55.8	29.4	0.3
EB208	650	10.5	24.9	62.2	52.8	24.2	0.3
EB212	800	9.2	12.0	98.2	69.5	10.7	1.0
EB215	800	9.6	15.9	84.7	68.2	16.2	10.0
EB210	900	6.3	7.2	113.2	83.8	19.4	1.0
EB214	900	8.2	9.8	107.8	82.1	13.9	10.0

Table A2 Tensile test results of SUS 321 steel (plate).

Specimen No.	Test Temp (°C)	0.2%P.S. (kg/mm²)	U.T. S. (kg/mm²)	F. E (%)	R. A. (%)	U.E. (%)	Strain rate (% / min)
EE 101	20	25.2	63.3	56.0	76.8	45.3	0.3 / 7.5
EE 102	20	25.1	62.6	56.3	74.2	45.7	0.3 / 7.5
EE 103	100	22.1	52.5	48.5	74.1	35.9	0.3 / 7.5
EE 104	100	23.0	52.7	47.9	73.8	35.7	0.3 / 7.5
EE 105	200	18.8	46.6	43.5	70.0	33.1	0.3 / 7.5
EE 106	200	19.3	46.6	42.7	71.4	32.0	0.3 / 7.5
EE 107	300	17.6	45.5	39.0	66.8	31.4	0.3 / 7.5
EE 108	300	18.8	46.4	38.6	65.3	30.7	0.3 / 7.5
EE 109	350	17.5	46.2	39.9	63.8	30.4	0.3 / 7.5
EE 110	350	16.9	45.8	39.5	64.4	31.7	0.3 / 7.5
EE 111	400	18.0	46.7	38.3	64.6	30.0	0.3 / 7.5
EE 112	400	16.7	45.8	38.6	65.1	30.8	0.3 / 7.5
EE 113	450	16.2	45.2	37.8	63.3	30.2	0.3 / 7.5
EE 114	450	16.1	45.6	39.1	62.7	30.9	0.3 / 7.5
EE 115	500	15.6	43.8	39.5	65.3	30.7	0.3 / 7.5
EE 116	500	16.0	44.4	38.0	62.5	30.1	0.3 / 7.5
EE 117	550	16.9	43.1	36.4	62.8	27.1	0.3 / 7.5
EE 118	550	16.6	42.6	37.8	64.2	27.9	0.3 / 7.5
EE 119	600	15.9	40.1	36.8	65.3	26.5	0.3 / 7.5
EE 120	600	15.6	40.5	37.4	65.2	27.0	0.3 / 7.5
EE 121	650	15.0	34.8	42.3	70.3	23.2	0.3 / 7.5
EE 122	650	14.7	36.1	40.2	67.7	24.4	0.3 / 7.5
EE 124	700	16.1	28.2	50.3	62.7	15.6	1.0
EE 135	700	15.0	27.3	58.9	66.1	17.5	1.0
EE 125	800	13.2	16.6	69.4	86.4	11.4	1.0
EE 136	800	12.6	16.2	64.4	87.4	13.4	1.0
EE 127	900	8.6	9.0	94.5	91.7	7.9	1.0
EE 128	900	7.3	8.0	88.5	96.7	9.2	1.0
EE 130	700	15.3	29.6	51.8	73.6	20.7	10.0
EE 137	700	14.6	29.5	51.8	72.8	20.8	10.0
EE 131	800	13.7	18.7	74.2	88.4	15.3	10.0
EE 132	800	15.1	19.8	72.4	85.4	12.7	10.0
EE 133	900	10.2	11.3	97.0	97.9	10.1	10.0
EE 134	900	9.4	10.9	101.8	98.2	10.9	10.0
EE 138	500	14.9	47.0	38.3	58.7	30.9	0.3
EE 139	550	17.1	44.7	36.7	61.6	27.8	0.3
EE 140	600	15.3	40.7	36.6	65.3	24.9	0.3
EE 143	800	12.8	17.0	67.3	85.6	12.7	1.0
EE 144	800	13.1	19.1	74.4	86.1	14.7	10.0
EE 141	900	7.5	8.4	116.	97.7	7.8	1.0
EE 142	900	10.0	11.2	101.2	97.8	12.2	10.0

Table A3 Tensile test results of SUS 321 steel (forged).

Specimen No.	Test Temp (°C)	0.2%P.S. (kg/mm ²)	U.T.S. (kg/mm ²)	F.E (%)	R.A. (%)	U.E. (%)	Strain rate (%/min)
ED123	20	23.5	56.1	62.7	73.5	50.8	0.3 / 7.5
ED124	22	24.3	55.7	62.6	72.7	51.2	0.3 / 7.5
ED103	500	18.6	40.8	39.0	65.5	29.3	1.0
ED104	500	18.6	40.8	39.2	64.8	28.6	1.0
ED105	600	17.0	35.3	41.8	72.3	26.2	1.0
ED106	600	17.3	35.2	42.3	68.9	26.5	1.0
ED107	700	16.0	23.8	67.8	68.6	16.8	1.0
ED108	700	16.0	24.4	67.4	67.6	16.9	1.0
ED109	800	13.6	15.4	70.4	81.3	9.87	1.0
ED110	800	14.0	15.3	67.3	82.0	8.34	1.0
ED111	900	8.50	8.66	96.8	97.6	3.08	1.0
ED112	900	8.47	8.59	86.7	97.9	3.75	1.0
ED113	500	19.9	39.0	38.1	68.4	29.0	10.0
ED114	500	18.8	40.1	40.5	69.4	30.0	10.0
ED115	600	20.6	35.2	36.5	67.4	27.7	10.0
ED116	600	19.4	35.0	38.2	69.9	26.2	10.0
ED117	700	16.5	27.1	59.9	72.6	20.0	10.0
ED118	700	16.2	27.4	63.6	74.0	20.3	10.0
ED119	800	14.7	18.6	91.2	82.2	10.4	10.0
ED110	800	14.8	18.2	93.8	83.3	10.2	10.0
ED111	900	10.5	11.0	122.0	97.8	8.2	10.0
ED112	900	10.2	10.7	117.0	98.1	7.6	10.0

Table A4 Tensile test results of 2½Cr-1Mo steel (plate).

Specimen No.	Test Temp (°C)	0.2%P.S. (kg/mm²)	U.T.S. (kg/mm²)	F.E (%)	R.A. (%)	U.E. (%)	Strain rate (% / min)
EC 101	20	42.7	61.3	28.0	76.7	11.2	0.3 / 7.5
EC 102	21	42.9	61.3	27.6	76.2	11.2	0.3 / 7.5
EC 103	100	40.5	56.4	25.6	77.1	10.3	0.3 / 7.5
EC 104	100	40.3	56.3	25.4	76.2	10.4	0.3 / 7.5
EC 105	200	37.4	52.3	23.6	77.1	10.1	0.3 / 7.5
EC 106	200	37.4	52.4	22.9	77.1	9.8	0.3 / 7.5
EC 107	300	36.7	50.8	20.7	74.3	8.9	0.3 / 7.5
EC 108	300	36.6	50.6	20.6	74.5	8.9	0.3 / 7.5
EC 109	350	36.3	50.8	20.2	72.9	9.1	0.3 / 7.5
EC 110	350	36.6	50.9	20.0	73.3	8.9	0.3 / 7.5
EC 111	400	36.0	50.2	20.5	73.0	9.0	0.3 / 7.5
EC 112	400	35.9	50.1	20.4	70.5	8.9	0.3 / 7.5
EC 113	450	35.0	46.9	23.9	74.9	8.2	0.3 / 7.5
EC 114	450	35.0	47.1	24.0	75.9	8.6	0.3 / 7.5
EC 115	500	33.6	42.5	28.4	80.3	7.0	0.3 / 7.5
EC 116	500	33.4	42.6	27.8	80.6	6.8	0.3 / 7.5
EC 117	550	30.9	37.2	32.6	86.4	5.4	0.3 / 7.5
EC 118	550	30.6	37.0	34.0	86.7	5.5	0.3 / 7.5
EC 145	400	36.5	50.7	22.4	73.4	8.6	0.3
EC 119	450	36.7	46.1	27.9	79.1	7.2	0.3
EC 120	500	34.8	40.0	36.2	85.4	4.3	0.3
EC 121	550	32.6	33.8	51.8	90.9	1.9	0.3

Table A5 Elasto-plastic parameters of SUS 304 (plate).

Strain rate $\dot{\epsilon}$	Temp. [°C]	T. P. No.	E [kg/mm ²]	σ_p [kg/mm ²]	m [—]	K [kg/mm ²]
JIS	20	EB127	16,284.8	14,962	0.312	44,789
		EB128	16,174.9	15,310	0.335	48,791
	100	EB129	14,711.2	12,212	0.361	46,655
		EB130	11,422.4	11,868	0.356	47,295
	200	EB131	10,267.5	10,201	0.391	49,807
		EB132	17,385.2	8,125	0.305	42,482
	300	EB133	13,453.3	9,468	0.404	49,946
		EB134	14,405.6	9,764	0.431	53,880
	350	EB137	13,665.6	9,059	0.380	46,197
		EB139	14,538.8	9,083	0.380	43,850
	400	EB135	12,892.6	7,895	0.371	47,512
		EB136	11,637.5	7,908	0.362	44,535
	450	EB103	14,059.7	8,588	0.412	48,638
		EB104	13,147.3	8,561	0.427	53,270
	500	EB101	18,723.3	8,886	0.427	49,021
		EB102	12,482.5	8,759	—	—
	550	EB105	15,929.1	7,333	0.390	47,871
		EB106	16,959.5	7,301	0.391	46,778
	600	EB107	10,929.9	7,467	0.414	48,009
		EB109	11,174.3	7,944	0.413	47,117
	650	EB110	11,523.8	8,562	0.426	45,953
		EB111	14,837.7	7,341	0.370	41,317
1.0%/min	800	EB212	13,058.7	5,570	0.223	14,237
	900	EB210	11,129.5	4,679	0.139	3,760
10%/min	800	EB215	11,098.5	5,551	0.306	25,434
	900	EB214	9,169.7	5,049	0.176	8,810

Table A6 Elasto-plastic parameters of SUS321(plate).

Strain rate $\dot{\epsilon}$	Temp. [°C]	T. P. No.	E (kg/mm ²)	σ_p (kg/mm ²)	m (-)	K (kg/mm ²)
JIS	20	EE101 EE102	15,774.6 15,198.8	16,602 18,870	0.293 0.360	50,064 55,707
	100	EE103 EE104	14,796.6 12,746.6	14,359 14,946	0.295 0.294	44,983 46,630
	200	EE105 EE106	13,670.2 16,169.4	13,431 12,721	0.389 0.322	56,749 43,724
	300	EE107 EE108	10,645.9 15,218.0	13,097 12,157	0.430 0.352	57,454 54,236
	350	EE109 EE110	16,363.5 13,048.7	12,748 12,093	0.432 0.417	62,845 58,732
	400	EE111 EE112	15,351.1 10,420.9	12,107 11,792	0.360 0.426	51,759 60,991
	450	EE113 EE114	16,390.6 19,256.1	9,947 9,087	0.380 0.338	60,351 52,833
	500	EE115 EE116	13,119.0 14,118.7	11,160 10,411	0.446 0.401	64,912 61,865
	550	EE117 EE118	14,263.8 14,506.4	11,339 11,393	0.379 0.385	54,853 51,774
	600	EE119 EE120	11,480.9 10,929.6	11,180 10,855	0.412 0.426	54,775 60,759
	650	EE121 EE122	11,657.3 10,017.7	10,719 10,951	0.453 0.455	60,638 59,006
	800	EE143	12,891.1	7,736	0.173	14,415
	900	EE141	8,312.8	5,833	0.137	3,940
10%/min	800	EE144	10,160.0	6,853	0.179	18,212
	900	EE142	10,238.4	6,468	0.103	6,495

Table A7 Elasto-plastic parameters of 2½Cr-1Mo steel (plate).

Strain rate $\dot{\epsilon}$	Temp. [°C]	T. P. No	E [kg/mm ²]	σ_p [kg/mm ²]	m [-]	K [kg/mm ²]
JIS	20	EC 101	19,881.7	34,629	0.434	95,343
		EC 102	19,591.0	33,989	0.401	86,580
	100	EC 103	19,472.7	31,215	0.375	78,275
		EC 104	19,331.5	31,765	0.374	73,142
	200	EC 105	17,811.3	30,275	0.407	77,289
		EC 106	17,664.1	28,725	0.358	69,442
	300	EC 107	18,447.9	24,723	0.292	66,201
		EC 108	19,023.3	24,388	0.280	62,627
	350	EC 109	18,764.6	23,252	0.277	64,678
		EC 110	18,544.4	24,136	0.284	66,190
	400	EC 111	16,830.5	26,829	0.342	71,460
		EC 112	20,125.3	25,896	0.328	72,063
	450	EC 113	17,714.6	20,673	0.231	56,338
		EC 114	16,551.0	20,410	0.232	57,013
	500	EC 115	15,762.9	20,585	0.213	45,395
		EC 116	15,866.9	20,364	0.232	57,013
	550	EC 117	14,359.1	18,551	0.186	35,987
		EC 118	13,532.3	19,368	0.180	10,670