

# 高張力鋼板の材料モデル高精度化に資する 温間面内反転負荷試験機の開発

東京農工大学 工学研究院 機械システム工学専攻  
教授 桑原利彦  
(平成 23 年度一般研究開発助成 AF-2011010)

キーワード：高張力鋼板，温度依存性，バウシング効果

## 1. 研究の背景

近年，自動車業界において，事故時の衝突安全性を確保するための法制度や基準の引き上げにより，自動車車体の構成部品の高強化が進められている．その一方で，地球温暖化対策として，自動車の燃費向上のための車体軽量化が急速に進められている．軽量化と高強度化という，相反する要求を達成するため，自動車の車体部品への高張力鋼板の使用比率が拡大している．

高張力鋼板を適用する際に問題になるのが，鋼板の成形性である．高張力鋼板は軟鋼板に比べて延性に乏しく割れが生じやすい．また，塑性流動応力が高く，除荷時の非線形性が強いいため，軟鋼板と比べてスプリングバック量も大きい．

スプリングバックが大きい材料を成形する場合には，その大きなスプリングバック量を見込んだ金型設計をしなければならず，これが金型の製作コストを増大させ，高張力鋼板の適用拡大の妨げとなっている．金型の製作コストを低減させるためには，有限要素法（FEM）を用いた成形シミュレーションの高精度化が必要である<sup>2)</sup>．

特にスプリングバック予測精度向上のためには，曲げ応力の予測精度向上が不可欠である．曲げを受けた材料には圧縮の応力場が発生するが，多くの鉄鋼材料では引張と圧縮の塑性流動応力が同じにならない（引張／圧縮非対称性）．また，曲げ戻し変形を受けると，板内部の応力の負荷方向が反転するため，バウシング効果の影響が顕著となる．そのため曲げ曲げ戻し変形を受けた部位の形状凍結性を予測するには，引張／圧縮非対称性及びバウシング効果を考慮した材料構成則の入力が必須である．

さらに，高張力鋼板は加工発熱による温度上昇が大きい．一例として，渋谷<sup>0)</sup>によって測定された590MPa 級，780MPa

級，980MPa 級の各種鋼板についてセンターピラーとメンバー部品を5回成形した後の成形品の温度を Fig. 1に示す．このように場合によっては100℃近くまで成形品の温度が上昇することが分かっている．また，鋼板には温度依存性があることが知られており，成形中の昇温を考慮した材料構成則が必要であると考えられる．しかしながら，単軸引張状態における温度依存性については研究がなされているものの<sup>4)5)</sup>，圧縮特性並びに反転負荷特性に及ぼす温度の影響を検討した例は，筆者が調査した限りでは存在しない．

そこで本研究では300℃程度の温度を試験片に加えながら面内反転負荷試験を行える装置を開発し，室温と100℃における単軸引張／圧縮ならびに反転負荷によるバウシング効果の温度依存性を明らかにしたので報告する．

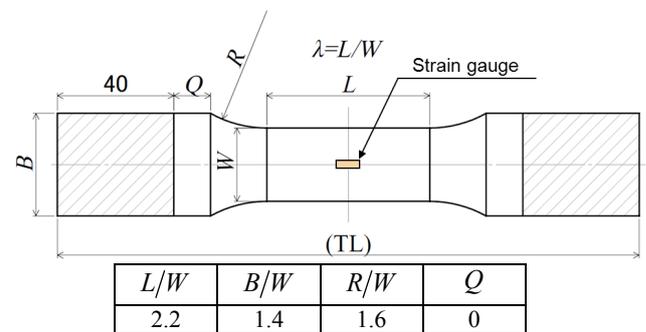


Fig. 2 Specimen geometry used in this study.

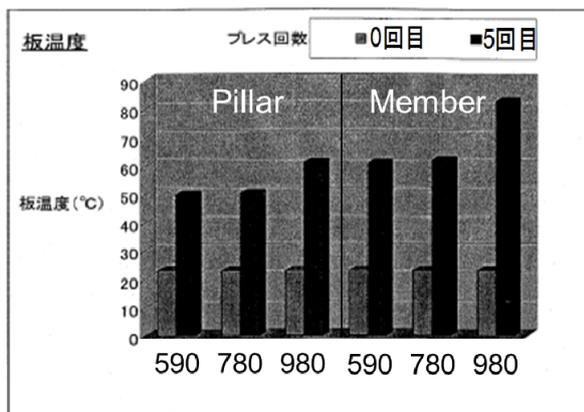


Fig. 1 Temperature increase of formed parts using various grade steel<sup>0)</sup>.

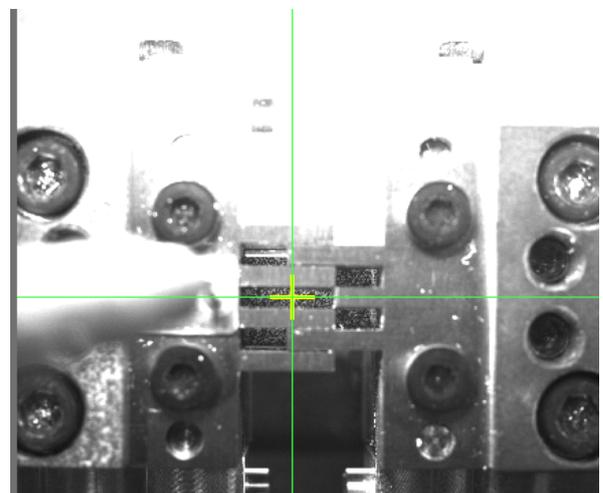


Fig. 3 A picture taken by ARAMIS

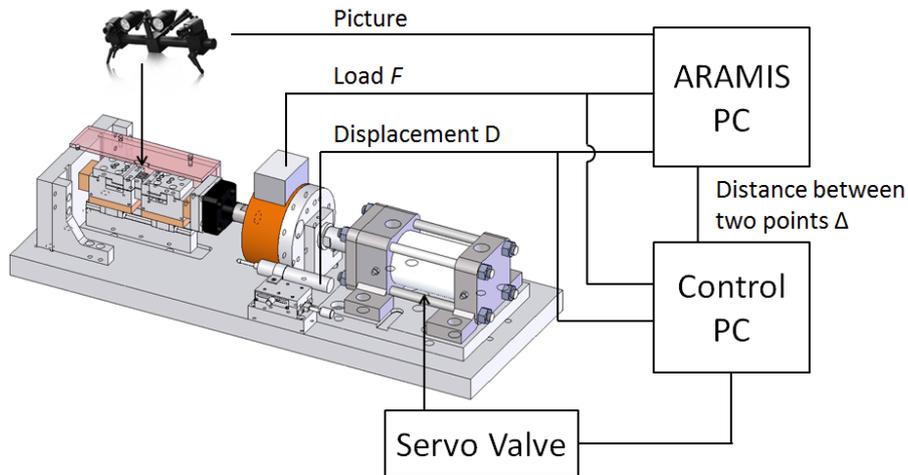


Fig. 4 A schematic illustration of the new in-plane reverse loading testing machine.

Table 2 Specifications of the new testing apparatus

項目	内容	備考
対応試験	単軸引張／圧縮試験	
	面内反転負荷試験	
定格荷重	30kN	150%校正にて使用
制御方法	チャック変位速度制御	AD/DA 変換ボードによる入出力同期制御
チャック可動距離	-5mm～+15mm	
ひずみ測定範囲	-15%～+60%程度	ARAMIS による DIC 測定
付与可能ひずみ速度	約 10 <sup>-1</sup> /s	
ヒータ定格出力	320℃	Watty 製ブロックヒータ

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

供試材は板厚1.2mm の590MPa 級析出硬化型鋼板（以下 JSC590R と称する）を用いた。常温での単軸引張試験から得られた圧延方向及び圧延直角方向の機械的性質を Table 1 に示す。

Table 1 Mechanical properties of the test material

Tensile Direction	$E$ /GPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$C^*$ /MPa	$n^*$	$\alpha^*$	$r^{**}$
Rolling	212	621	1047	0.188	-0.00347	0.580
Transverse	215	627	1074	0.200	0.00311	0.771

\*Approximated using  $\sigma = C(\alpha + \varepsilon^p)^n$  at  $\varepsilon^p = 0.021 \sim 0.092$

\*\*Measured at uniaxial nominal strain  $\varepsilon_N = 0.1$

### 2.2 試験片形状

試験片形状は応力測定精度に影響を及ぼす。とりわけ圧縮時には座屈を抑制するために試験片形状を最適化しなければならない。

文献 6) に基づき、各部の寸法を平行部幅  $W$  を基準として、平行部のアスペクト比  $\lambda = 2.2$  ( $=L/W$ )、 $R/W = 1.6$ 、 $B/W = 1.4$ 、 $Q = 0$  mm とする。

なお、全体の寸法は①ひずみ速度を速くすることができるよう、②加熱するためなるべく熱容量が小さくなるように小さい方が望ましい。そこで  $W = 10$  mm とし、0.1/s 程度のひずみ速度を達成すべく、試験片形状を決定した。

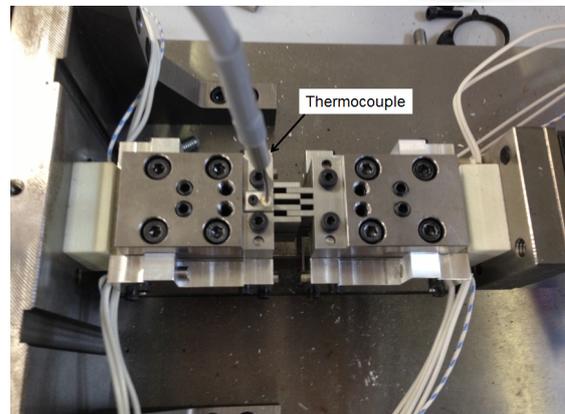
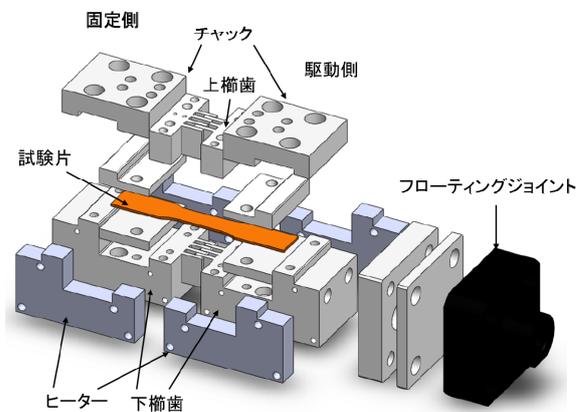


Fig. 5 Schematic illustration and its picture

### 2.3 ひずみ測定法

ひずみの測定にはデジタル画像相関法 (ARAMIS, GOM 社) を用いた。試験片表面に白黒のランダム模様を生成し、画像解析によって撮影した面内のひずみを測定できる。

Fig. 3 に実際に撮影した画像を示す。このように上櫛歯の隙間から見えている試験片表面を撮影し、ひずみを計測する。ファセットサイズは 10px, ファセットステップは 5px としている。

### 2.4 制作した試験機の概略

既存の面内反転負荷試験機<sup>7)</sup>を参考に、新たに試験片を加熱できる試験機を制作した。全体図を Fig. 4 に示す。ひずみの測定にはデジタルカメラで櫛歯のわずかな隙間に見えている試験片表面を撮影してひずみを測定する。

試験部の拡大画像と写真を Fig. 5 に示す。ヒーター (カートリッジヒーター, Watty 製) を下櫛歯金型の両側面に取り付けて試験片を加熱する。上櫛歯には上櫛歯に垂直に穴を空け、そこに熱電対を挿入し、試験片温度を測定している。試験機の詳細を Table 2 に示す。

しわ抑え方法は定間しわ抑え方法を採用した。スペーサーの写真を Fig. 6 に示す。

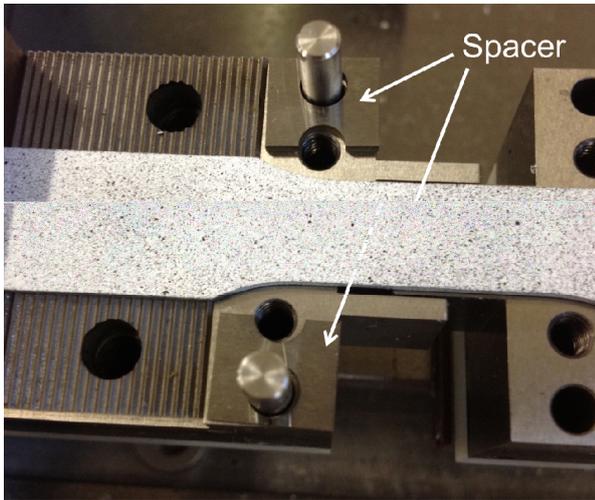


Fig. 6 A picture of set-up of spacers

## 3. 試験結果

### 3.1 引張/圧縮試験結果

3つの温度条件下で行った単軸引張試験結果を Fig. 7(a) に示す。黒線が室温、赤線が 50°C、青線が 100°C の試験結果である。ひずみが 0.2 の時、50°C では 20MPa の軟化、100°C では 67MPa の軟化を示した。Fig. 7(b) に引張強さと  $n$  値の昇温に伴う変化を示す。100°C まで加熱すると引張強さが 590MPa を下回ることが確認された。

3つの温度条件下で行った単軸圧縮試験結果を Fig. 8 に示す。前節と同じく黒線が室温、赤線が 50°C、青線が 100°C の試験結果である。また、各温度下において引張と圧縮を比較した図を Fig. 9 に示す。いずれの温度条件下でも、圧縮の方が引張よりも応力が高くなる引張/圧縮非対称性が確認された。

### 3.2 面内反転負荷試験

今回行った面内反転負荷試験の結果を Fig. 10 に示す。同図 (a) が室温での結果、(b) が 100°C の条件下での結果である。温度を高くすると、反転負荷後の加工硬化率が小さくなる傾向が確認された。

予ひずみが 0.05 のときは、室温と 100°C の条件下における反転直前の塑性流動応力の差異が 9.8% に対して、反転負荷後真ひずみ 0 の時の応力差が 15.5% であった。一方、予ひずみが -0.05 の時は、室温と 100°C の条件における塑性流動応力の差異は反転開始直前が 9.3% であり、真ひずみ 0 まで引張った時の差異は 15.6% であり、予ひずみが 0.05 の時と同様の傾向を示した。

バウシング効果の発現の様子をより詳細に検討するため、所定の方法で反転負荷後の SS 曲線を無次元化する。その方法及び結果を次節以降に示す。

## 4. 反転負荷後の SS 曲線の無次元化

### 4.1 無次元化の方法

反転負荷中の応力 - ひずみ線図を以下の方法で無次元化する。本方法の概略図を Fig. 11 に示す。反転負荷中の真応力を  $\sigma$ 、反転負荷開始直前の真応力を  $\sigma_u$ 、反転負荷後に発生した真ひずみ増分を  $\Delta\varepsilon$  とする。縦軸に時々刻々の反転負荷中に発生する応力  $\sigma$  を反転負荷開始直線の応力  $\sigma_u$  で無次元化した値  $\sigma/\sigma_u$ 、横軸に無次元化反転ひずみ  $\Delta\varepsilon/(\sigma_u/E)$  をとる。

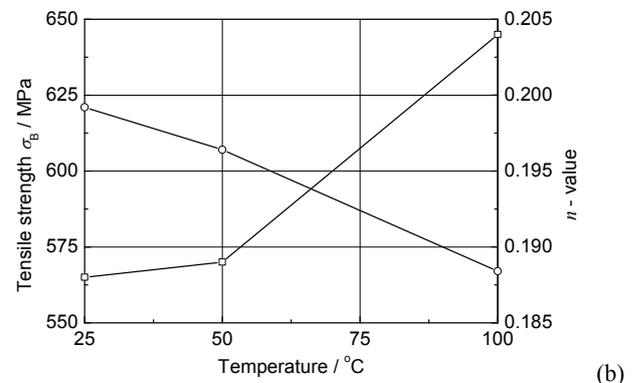
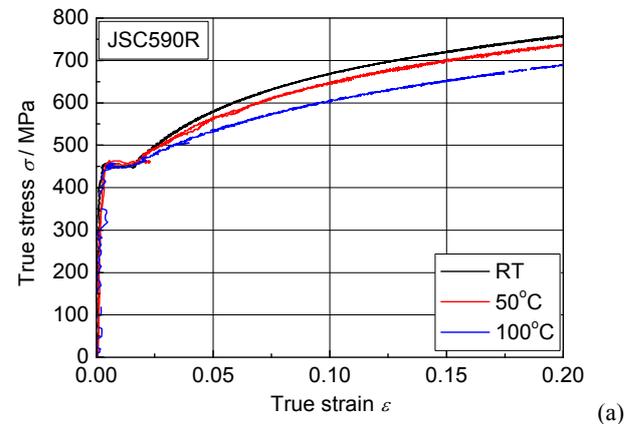


Fig. 7 Uniaxial tensile tests data under 3 different temperatures (a) SS-curves and (b) variation of  $n$ -value and Tensile strength.

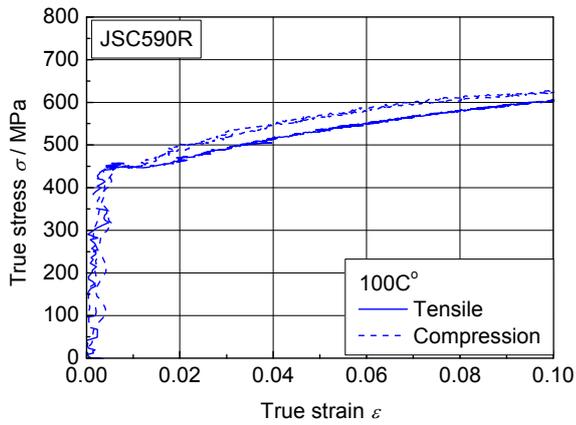
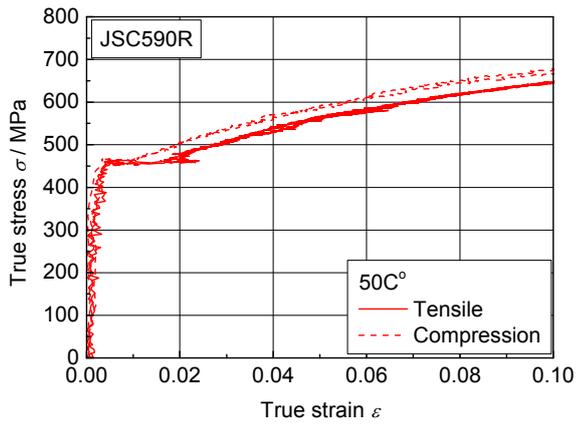
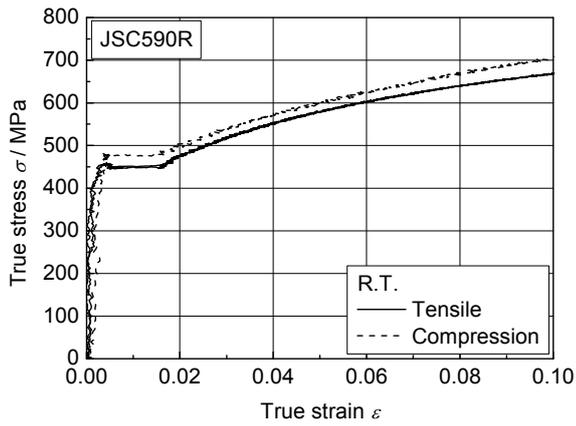


Fig. 8 Comparison of tensile and compression under 3 different temperatures (a) R.T., (b) 50°C and (c) 100°C.

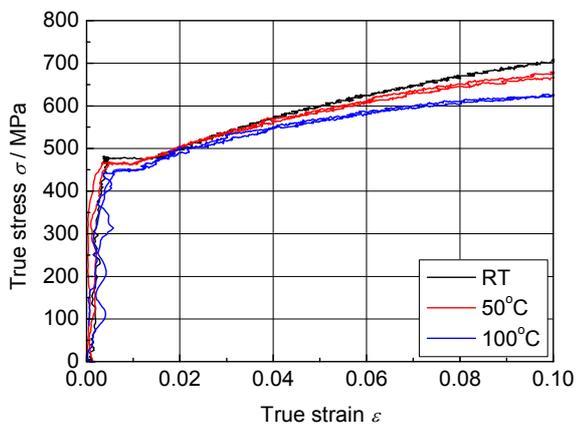


Fig. 9 Uniaxial Compression tests data under 3 different temperatures

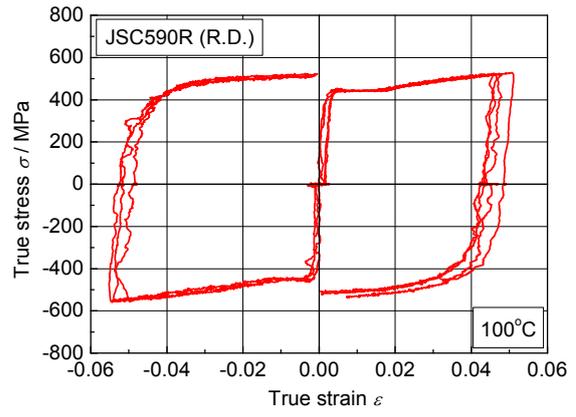
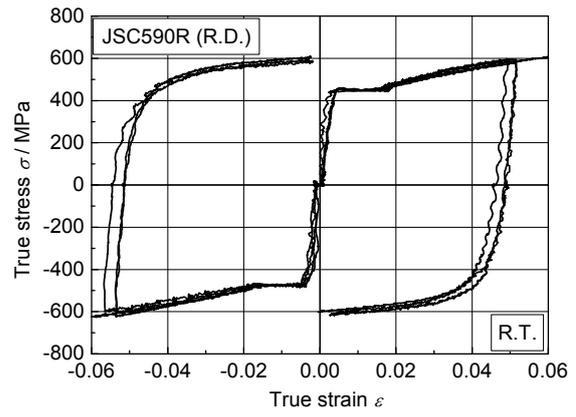


Fig. 10 In-plane reverse loading tests results under (a) R.T. and (b) 100°C

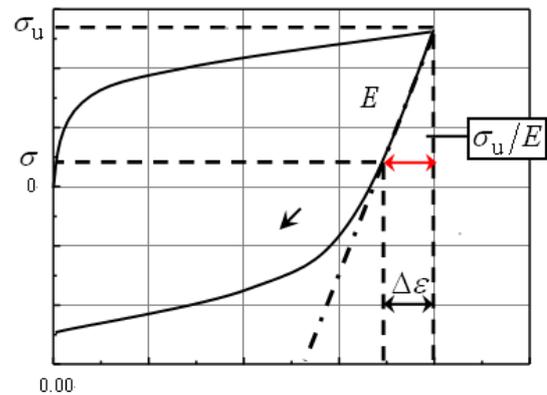


Fig. 11 Schematic illustration of SS curve and each parameters for unloading curve.

#### 4.2 無次元化 SS 曲線

JSC590R の無次元化 SS 曲線を Fig. 12 及び Fig. 13 に示す。Fig. 12 が同じ温度において予ひずみが異なる場合を比較しており Fig. 13 は同じ予ひずみにおいて温度が異なる場合を比較している。

まず、Fig. 12 を見てみると、温度が低い室温の場合、予ひずみが 0.05 (以下 TC5%などと表記) と -0.05 とでは無次元化 SS 曲線は重ならず、最大で 6%の差異が見られた。一方で、温度を 100°Cにすると、ばらつきが大きくなり、また、SS 曲線の差異は最大で 8.8%程度となった。

また、Fig. 13 を見てみると TC5%の時、室温での試験結果と 100℃の試験結果から得られた無次元化 SS 曲線はほぼ重なっている。一方で、CT5%の無次元化 SS 曲線は反転開始直後はややばらつきが大きい、 $\Delta\varepsilon/(\sigma_u/E) < 10$  では概ね重なっている。

以上のことから本供試材では室温、100℃の条件下ともに予ひずみによってバウシング効果の発現の様子に差異が見られることが分かった。一方で、予ひずみが同じであれば温度によらず反転負荷後の無次元化 SS 曲線は 1 つの近似関数で代表できる可能性があり、温度によるバウシング効果の発現の様子に差異は見られないことが分かった。このことについては今後予ひずみや温度のレベルを変えた試験を行い検討する。また、この現象は材料にも依存すると考えられるので、他の材料で検証を行いたいと考えている。

### 5. 結言

- 1) 2 つの温度条件について面内反転負荷試験を行った。温度を高くすると、反転負荷後の加工硬化率が小さくなる傾向が確認された。
- 2) 反転負荷後の SS 曲線を所定の方法で無次元化した。
- 3) 無次元化 SS 曲線は予ひずみが異なると 6%程度の差異が見られた。
- 4) 無次元化 SS 曲線は室温、100℃の条件下においてほぼ

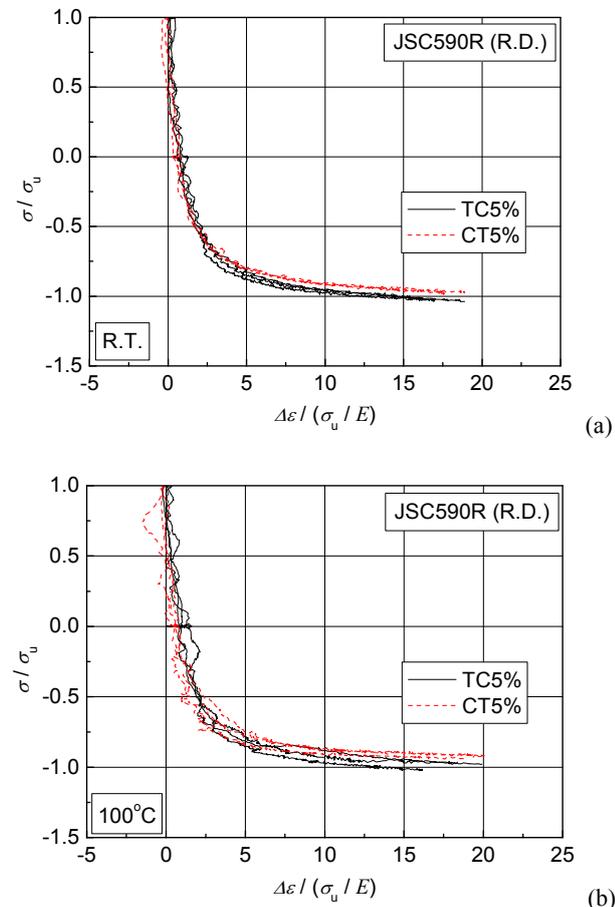


Fig. 12 Normalized SS curve under (a) R.T. and (b) 100℃

一致した。予ひずみが同じであれば温度によらず反転負荷後の無次元化 SS 曲線は 1 つの近似関数で代表できる可能性がある。

### 謝辞

本研究は公益財団法人天田財団より一般研究開発助成 (AF-2011010) を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

### 参考文献

- 1) Noma, N. and Kuwabara, T.: Steel Research Int., Special Edition: 10th ICTP 2011 (2011), 349-354.
- 2) Kuwabara, T.: Int. J. Plasticity, 23-3 (2007), 358-419.
- 3) 渋谷清：平成 21 年度サポイン資料 21UHT-2-2(4), (2010), 1.
- 4) Sung, J.H., Kim, J.H. and Wagoner, R.H.: Int. J. Plasticity, 26 (2010), 1746-1771.
- 5) Rezaei Ashtiani, H.R., Parsa, M.H. and Bisadi, H.: Mat. Sci. Eng. A, 545 (2012), 61-67.
- 6) Noma, N. and Kuwabara, T.: Steel Research Int., Special Edition: 14th Metal Forming (2012), 1283-1286.
- 7) Kuwabara, T., Kumano, Y., Ziegelheim, J. and Kurosaki, I.: Int. J. Plasticity, 25-9, (2009), 1759-1776.

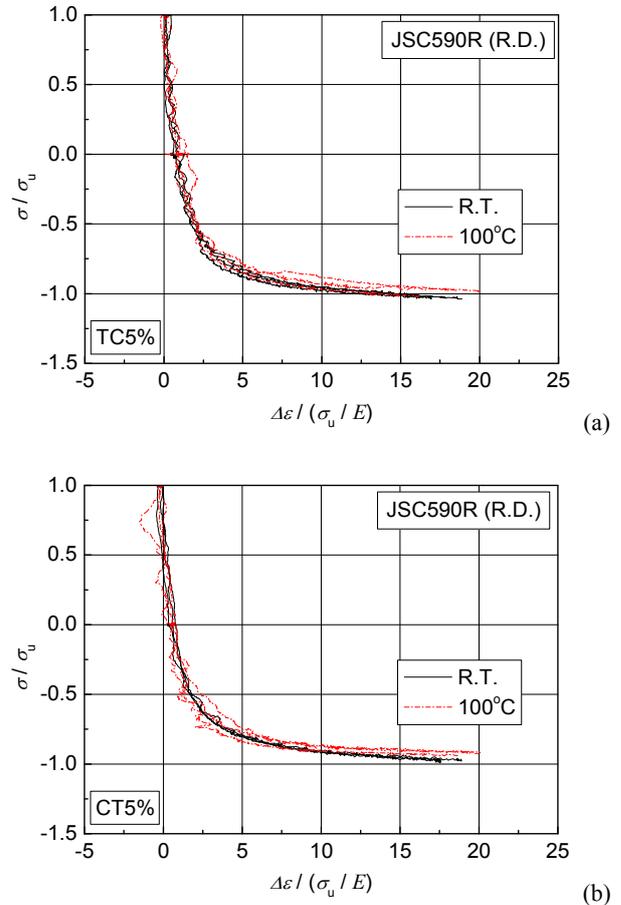


Fig. 13 Normalized SS curve pre-strained (a) 0.05 and (b) -0.05