

## 静的引張試験による二相系ステンレス鋼の材料特性

### Material Behavior of the Duplex Stainless Steel by the Static Tensile Testing

○佐藤 信輔\*  
Shinsuke SATO\*

宮寄 靖大\*\*  
Yasuhiro MIYAZAKI\*\*

**ABSTRACT** This study investigates material behavior of four type duplex stainless steels by tensile testing. Firstly, four type stainless steels are general type SUS329J3L and SUS329J4L, lean type SUS323L and SUS821L1 for JIS. Secondary, the tensile testing is based on JIS Z2241. The nondimensional stress-strain relationship of duplex stainless steels by 0.01% proof stress determined discriminating between the general duplex type and the lean type. Finally, the Ramberg-Osgood curve was able to these duplex stainless steels with an accuracy of less than maximum mean 3.5%.

**Keywords :** 二相系ステンレス鋼, 応力ひずみ関係, リーン二相鋼, Ramberg-Osgood 曲線, 汎用二相鋼

*Duplex stainless steel, stress-strain relationship, lean duplex type, Ramberg-Osgood curve, general duplex type*

#### 1. はじめに

ステンレス鋼は、従来の土木構造物主部材等に使用されている構造用炭素鋼に比べて優れた耐食性を有する。そのため、ステンレス鋼を土木構造物に用いることは、土木構造物のライフサイクルコストの低減に繋がると考えられる<sup>1)</sup>。ステンレス鋼のなかでも、二相系ステンレス鋼は、より高耐食性であるとともに、高強度を有するため、土木構造物主部材に活用することで構造物の高耐久化および薄肉軽量化を図ることができる。しかし、オーステナイト系および二相系ステンレス鋼は希少元素である Ni を含有しているため、高価であるとともに価格変動が炭素鋼に比べて大きくなることが知られている。そのため、初期費用が大きくなるステンレス鋼構造物は、我が国の土木構造物主部材への積極的な活用が行われていない<sup>2)</sup>。このような背景から、SUS316 と同等の耐食性<sup>3)</sup>と二相系ステンレス鋼の特徴である高強度を有し、Ni の含有量を 4%以下に削減したり

ーン二相系ステンレス鋼<sup>4)</sup>が 2015 年 9 月に JIS 化された。このようなリーン二相系ステンレス鋼を使用した土木構造物の実現は、一般的なステンレス鋼に比べて構造物の高耐久高強度化および初期コストの低減が期待できる。そのためには、これら材料で構成される構造物の力学的特性を詳細に明らかにしておく必要がある。その一手法として用いられる数値計算では、材料の応力ひずみ関係が重要であることが周知である。しかし、ステンレス鋼は、構造用炭素鋼に比べ低降伏比であり、その応力ひずみ関係として弾完全塑性体と仮定する場合、ステンレス鋼の特徴である高延性の性質を有効に活用できない。これまでに、著者らは、高強度ステンレス鋼の応力ひずみ関係への Ramberg-Osgood 曲線の適用性を検証してきた<sup>5)</sup>。

本研究では、二相系ステンレス鋼 4 種の引張試験を実施し<sup>6)</sup>、汎用二相鋼とリーン二相鋼の材料特性を明確にする。また、これら材料試験により得られ

\*長岡工業高等専門学校専攻科 環境都市工学専攻 (〒940-8532 新潟県長岡市西片貝 888)

\*\*博士 (工学) 長岡工業高等専門学校准教授 環境都市工学科

(〒940-8532 新潟県長岡市西片貝 888) 第2種正会員

表 1 対象とする二相系ステンレス鋼の化学成分(wt%)

鋼種	板厚(mm)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	W	Cu	Ti	Nb	Co
SUS329J3L	10	0.013	0.33	0.93	0.025	0.000	5.42	22.60	3.11	0.17	-	-	-	-	-
	20	0.014	0.32	0.93	0.024	0.000	5.42	22.58	3.12	0.18	-	-	-	-	-
SUS329J4L	10	0.010	0.39	0.72	0.031	0.001	6.58	24.62	3.27	0.17	0.13	-	-	-	-
	20	0.017	0.36	0.74	0.033	0.000	6.58	24.63	3.27	0.12	0.17	-	-	-	-
SUS323L	10	0.013	0.55	1.60	0.031	0.000	4.00	23.80	0.34	0.15	-	0.16	-	-	-
	20	0.014	0.56	1.61	0.029	0.000	4.00	23.60	0.34	0.16	-	0.22	0.00	0.03	0.10
SUS821L1	10	0.020	0.34	3.22	0.025	0.000	2.23	20.82	0.47	0.17	-	1.06	-	-	0.07
	20	0.027	0.30	3.18	0.024	0.000	2.14	20.83	0.27	0.15	-	1.04	-	-	0.06

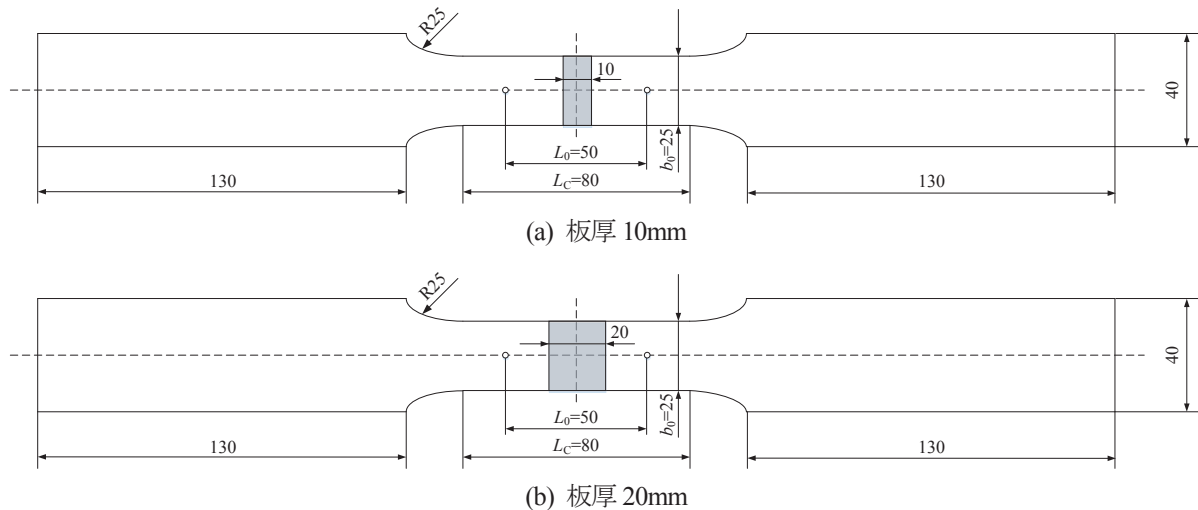


図 1 JIS Z2241 5号試験片<sup>8)</sup>

た二相系ステンレス鋼の応力ひずみ関係については、Ramberg-Osgood 曲線<sup>5)</sup>により再現することを試みる。

## 2. 引張試験

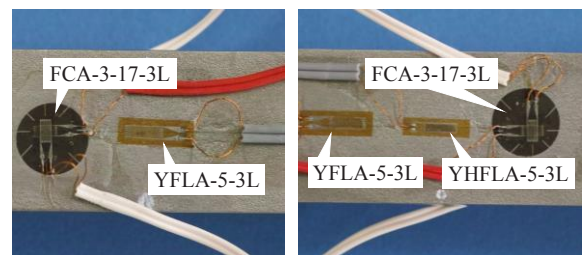
### 2. 1 引張試験片

本研究で対象とする二相系ステンレス鋼は、汎用二相鋼 SUS329J3L および SUS329J4L、リーニ二相鋼 SUS323L および SUS821L1 である。また、これら 4 種の二相系ステンレス鋼は、それぞれ板厚 10mm および 20mm の板材を用いた。表 1 は、これらの二相系ステンレス鋼の化学成分をまとめている。同表より、リーニ二相鋼の Ni および Mo の含有量は、汎用二相鋼に比べ平均約 48% および約 89% 少ないことが確認できる。

図 1 は、本研究に用いた引張試験片形状を示している。同図の試験片形状は、JIS Z2241 5号試験片である<sup>8)</sup>。また、同図中の記号は  $L_c$  が平行部長さ、 $L_0$  が標点間距離、 $b_0$  が平行部板幅を意味している。表 2 は、本研究で実施した試験片をまとめている。同表中の試験片名は、鋼種、板厚、試験片採取方向の順に表している。ここで、試験片採取方向は、RD が圧延方向、TD が圧延直角方向を意味する。なお、

表 2 対象とする引張試験片

試験片名	鋼種	板厚 $t$ (mm)	採取方向
J3L-10-RD-1,2,3	SUS329J3L	10	RD
J3L-10-TD-1,2,3			TD
J3L-20-RD-1,2,3		20	RD
J3L-20-TD-1,2,3			TD
J4L-10-RD-1,2,3	SUS329J4L	10	RD
J4L-10-TD-1,2,3			TD
J4L-20-RD-1,2,3		20	RD
J4L-20-TD-1,2,3			TD
323-10-RD-1,2,3	SUS323L	10	RD
323-10-TD-1,2,3			TD
323-20-RD-1,2,3		20	RD
323-20-TD-1,2,3			TD
821-10-RD-1,2,3	SUS821L1	10	RD
821-10-TD-1,2,3			TD
821-20-RD-1,2,3		20	RD
821-20-TD-1,2,3			TD



(a) 試験片表面 (b) 試験片裏面

図 2 ひずみゲージ貼付け状況

表 2 に示すように、各条件の試験片は 3 体ずつ製作した。

## 2. 2 引張試験方法

引張試験は、JIS Z2241 に基づき実施した。使用した試験機は、東京試験機製油圧式万能試験機 RU1000D である。なお、試験速度は JIS Z2241 に従い、ミルシートに示される耐力までは応力増加速度が 10MPa/s、その後は試験機のクロスヘッド変位速度が 15mm/min となるように設定した。試験中のデータは、試験機付属のロードセルより荷重を、試験片に貼付けたひずみゲージよりひずみをそれぞれ計測した。ここで、ひずみゲージ(いずれも東京測器研究所製)は、試験片平行部両面に計測ひずみ範囲 5% の弾性 2 軸ひずみゲージ FCA-3-17-3L および計測ひずみ範囲 15 から 20% の塑性単軸ひずみゲージ YFLA-5-3L を、片面に計測ひずみ範囲 30 から 40% の塑性単軸ひずみゲージ YHFLA-5-3L を設置した。なお、弾性ひずみゲージは、ヤング係数およびポアソン比を計測するために設置した。図 2 は、これらひずみゲージの試験片への設置後の状況を示す。なお、323-20-RD-3 の引張試験では、試験中のデータを取得できなかったため、この結果を除外する。

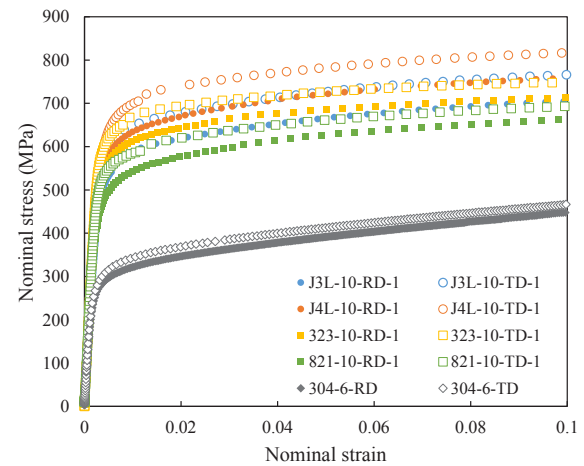
## 3. 引張試験結果

図 3 は、板厚 10mm の試験片を用いた引張試験により得られた公称応力公称ひずみ関係を示す。なお、同図には、比較のため、一般的なステンレス鋼であるオーステナイト系 SUS304 の 6mm 試験片の引張試験結果<sup>9)</sup>を示している。ここで、図 3 の縦軸は計測した荷重を試験片平行部の元断面積で除した公称応力、横軸は試験片に設置した 3 種類のひずみゲージより計測されたひずみの値を平均した公称ひずみである。同図より、対象とした二相系ステンレス鋼は、SUS304 に比べて高強度であることがわかる。つぎに、全ての二相系ステンレス鋼の圧延直角方向の公称応力公称ひずみ関係は、圧延方向に比べて同一ひずみ時の応力が平均約 7% 大きくなることわかる。

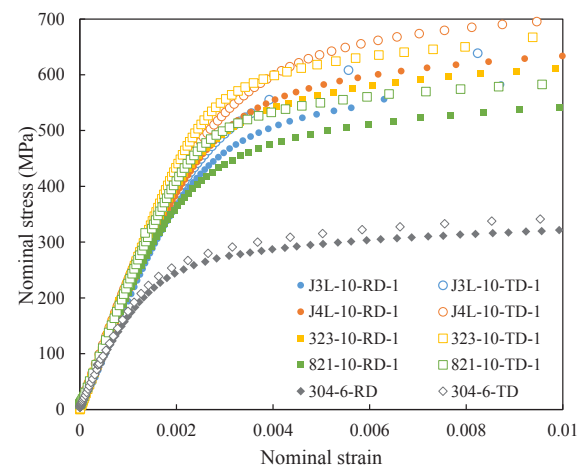
図 4 は、引張試験前後の試験片の写真を示す。同図に示すように、対象とした全試験片は、平行部にて延性破断することを確認した。

表 3 は、本研究で実施した引張試験により得られた材料特性をまとめている。ここで、同表には、比較のため、既往の研究<sup>7)9)</sup>で得られた SM570 および SUS304 の結果も示している。なお、同表中のヤング係数はミルシート記載の 0.2%耐力を基準に、その値

の 0.2, 0.3, 0.4 および 0.5 倍に対応する応力点を取り出し、0.2 から 0.3 倍、0.2 から 0.4 倍および 0.2 から 0.5 倍の 3 区間の割線勾配を平均して決定している<sup>10)</sup>。また、同表に示す耐力は、オフセット法を用

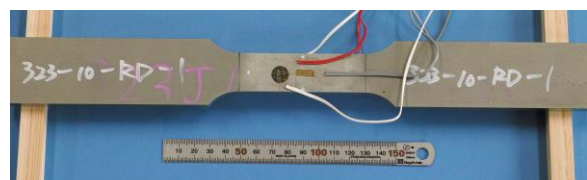


(a) 1%ひずみまでの範囲

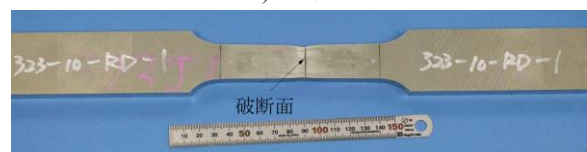


(b) 10%ひずみまでの範囲

図 3 二相系ステンレス鋼の公称応力公称ひずみ関係



(a) 試験前



(b) 試験後

図 4 引張試験前後の試験片状況(323-10-RD-1)

表3 対象とした二相系ステンレス鋼の機械的性質

試験片名	ヤング係数 $E$ (GPa)	ポアソン比 $\nu$	0.01%耐力 $\sigma_{0.01}$ (MPa)	0.2%耐力または降伏応力 $\sigma_{0.2}$ or $\sigma_y$ (MPa)	引張強さ $\sigma_t$ (MPa)	降伏比 $\sigma_{0.2}/\sigma_t$ or $\sigma_y/\sigma_t$	$\sigma_{0.01}$ と $\sigma_{0.2}$ の比 $\sigma_{0.01}/\sigma_{0.2}$	破断伸び $\delta$ (%)
J3L-10-RD-1	201	0.217	322	523	731	0.715	0.615	41
J3L-10-RD-2	202	0.220	353	521	729	0.715	0.677	40
J3L-10-RD-3	192	0.214	333	514	725	0.709	0.648	41
AVE	198	0.217	336	519	729	0.713	0.647	41
J3L-10-TD-1	213	0.226	348	581	787	0.739	0.599	36
J3L-10-TD-2	220	0.236	326	590	785	0.752	0.553	38
J3L-10-TD-3	218	0.240	337	583	784	0.744	0.577	36
AVE	217	0.234	337	585	786	0.745	0.576	37
J3L-20-RD-1	201	0.218	316	502	731	0.687	0.629	52
J3L-20-RD-2	207	0.214	310	502	732	0.685	0.619	52
J3L-20-RD-3	198	0.240	297	502	732	0.686	0.590	52
AVE	202	0.224	308	502	732	0.686	0.613	52
J3L-20-TD-1	224	0.252	313	567	765	0.740	0.552	46
J3L-20-TD-2	219	0.248	301	544	765	0.711	0.554	47
J3L-20-TD-3	202	0.251	302	544	764	0.712	0.555	48
AVE	215	0.250	305	551	765	0.721	0.553	47
J4L-10-RD-1	209	0.203	359	576	773	0.745	0.624	40
J4L-10-RD-2	201	0.199	384	576	772	0.745	0.667	42
J4L-10-RD-3	195	0.211	377	579	772	0.749	0.652	42
AVE	201	0.204	373	577	773	0.746	0.648	41
J4L-10-TD-1	220	0.224	412	636	830	0.766	0.647	35
J4L-10-TD-2	219	0.225	414	639	830	0.769	0.647	36
J4L-10-TD-3	210	0.228	393	641	831	0.771	0.613	34
AVE	217	0.226	406	638	831	0.769	0.636	35
J4L-20-RD-1	191	0.202	319	525	751	0.699	0.607	49
J4L-20-RD-2	196	0.211	320	524	748	0.701	0.611	46
J4L-20-RD-3	192	0.212	313	527	749	0.703	0.594	47
AVE	193	0.208	317	525	749	0.701	0.604	47
J4L-20-TD-1	206	0.258	335	580	787	0.737	0.577	44
J4L-20-TD-2	208	0.244	342	578	787	0.735	0.592	44
J4L-20-TD-3	204	0.231	334	575	785	0.733	0.581	45
AVE	206	0.244	337	578	786	0.735	0.583	44
323-10-RD-1	216	0.190	377	556	727	0.764	0.679	40
323-10-RD-2	210	0.201	381	552	727	0.760	0.690	40
323-10-RD-3	207	0.191	361	556	726	0.765	0.651	42
AVE	211	0.194	373	555	727	0.763	0.673	41
323-10-TD-1	231	0.198	425	612	755	0.810	0.695	34
323-10-TD-2	226	0.212	440	610	755	0.808	0.722	34
323-10-TD-3	225	0.220	418	610	755	0.808	0.685	38
AVE	227	0.210	428	611	755	0.809	0.701	35
323-20-RD-1	207	0.224	396	556	716	0.777	0.713	50
323-20-RD-2	207	0.229	399	558	717	0.778	0.715	50
AVE	207	0.226	398	557	717	0.777	0.714	50
323-20-TD-1	219	0.244	407	602	736	0.818	0.676	42
323-20-TD-2	220	0.245	410	600	736	0.815	0.684	44
323-30-TD-3	213	0.244	401	600	737	0.814	0.668	45
AVE	217	0.244	406	601	736	0.816	0.676	44
821-10-RD-1	200	0.236	333	488	698	0.698	0.683	49
821-10-RD-2	201	0.222	329	484	698	0.694	0.680	46
821-10-RD-3	201	0.226	307	484	697	0.694	0.635	50
AVE	201	0.228	323	485	698	0.696	0.666	48
821-10-TD-1	221	0.247	394	544	717	0.759	0.725	43
821-10-TD-2	215	0.242	396	541	718	0.754	0.731	47
821-10-TD-3	210	0.243	378	541	717	0.754	0.700	46
AVE	215	0.244	390	542	717	0.756	0.719	45
821-20-RD-1	208	0.215	337	496	695	0.714	0.679	59
821-20-RD-2	209	0.210	325	495	695	0.712	0.656	58
821-20-RD-3	204	0.210	328	497	696	0.714	0.661	58
AVE	207	0.212	330	496	695	0.713	0.665	58
821-20-TD-1	219	0.238	365	544	705	0.772	0.670	47
821-20-TD-2	220	0.230	366	539	706	0.763	0.680	49
821-20-TD-3	215	0.227	357	539	704	0.766	0.661	49
AVE	218	0.232	363	541	705	0.767	0.670	48
SUS304	178	0.3	-	259	697	0.372	-	71
SM570	206	0.3	-	504	570	0.884	-	26



いて算出している。同表より、汎用二相鋼およびリー二相鋼の降伏比は、SUS304 に比べ、平均約 1.96 倍および約 2.05 倍大きくなることわかる。一方、汎用二相鋼およびリー二相鋼の降伏比は、SM570 の約 82%および約 86%の大きさとなり、高強度かつ低降伏比であることがわかる。また、同表より、各条件の試験片の 0.2%耐力は、圧延直角方向が圧延方向に比べ約 10%大きいことがわかる。このことより、二相系ステンレス鋼で構成される構造物について、厳密には材料の異方性を考慮して構造物の強度特性を調べる必要があるが、構造設計または数値計算の煩雑さを避けるため、低強度側の材料特性値を用いることで十分であるといえる。

図 5 は、各鋼種各板厚の試験片 No.1 の結果について無次元化した公称応力公称ひずみ関係を示す。ステンレス鋼の応力ひずみ関係は、比例限界点となる 0.01%耐力  $\sigma_{0.01}$  点から非線形となるため、 $\sigma_{0.01}$  および 0.2%耐力  $\sigma_{0.2}$  点を基準として無次元化を行った。ここで、同図の縦軸は引張試験にて計測した公称応力を表 3 で示した各試験結果に対応する  $\sigma_{0.01}$  または  $\sigma_{0.2}$  で除した値を、横軸は引張試験にて計測した公称ひずみを 0.01%耐力時のひずみ  $\varepsilon_{0.01}$  または 0.2%耐力時のひずみ  $\varepsilon_{0.2}$  で除した値を示す。同図より、同図(a)の傾向は、同図(b)の傾向に比べ汎用二相鋼とリー二相鋼で無次元化した公称応力公称ひずみ関係の差が大きくなることわかる。これは、表 3 で示したように、汎用二相鋼およびリー二相鋼で平均した降伏比の差は約 4.9%であるのに対し、 $\sigma_{0.01}$  と  $\sigma_{0.2}$  の比の差は約 11.3%となり、汎用二相鋼の  $\sigma_{0.01}$  から  $\sigma_{0.2}$  の応力増加がリー二相鋼に比べて大きくなることによる。

#### 4. 二相系ステンレス鋼への Ramberg-Osgood 曲線の適用性の検証

本研究では、引張試験により得られた応力ひずみ関係を既往の研究<sup>5)7)</sup>と同様に、次式で示す Ramberg-Osgood 曲線<sup>11)</sup>で表現することを試みる。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left( \frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (1)$$

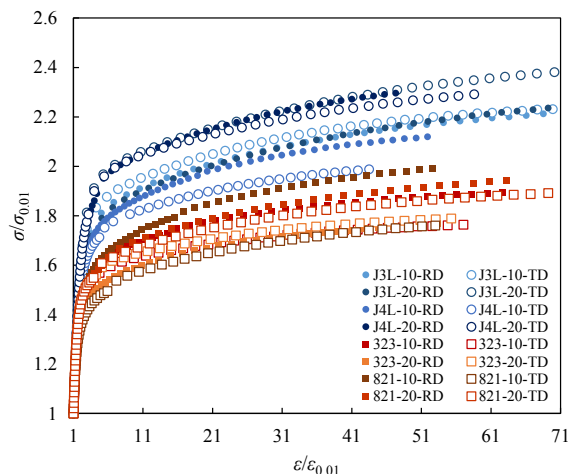
ここで、 $\varepsilon$  は公称ひずみ、 $\sigma$  は公称応力、 $K$  および  $n$  は式(2)および式(3)における材料定数を意味する。なお、これらの式に含まれる  $m_1$  および  $m_2$  は式(4)および式(5)で示される材料定数である。

$$K = \left( \frac{1}{m_1} - 1 \right) \left( \frac{\sigma_1}{E} \right)^{1-n} = \left( \frac{1}{m_2} - 1 \right) \left( \frac{\sigma_2}{E} \right)^{1-n} \quad (2)$$

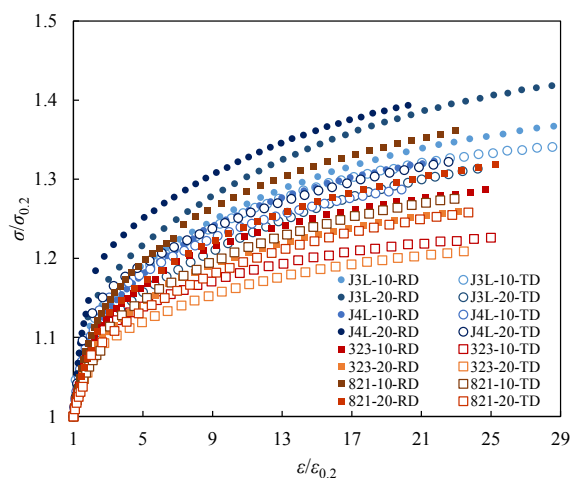
$$n = 1 + \frac{\log \left( \frac{m_2(1-m_1)}{m_1(1-m_2)} \right)}{\log \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)} \quad (3)$$

$$m_1 = \frac{1}{1 + \frac{a_1}{\sigma_1/E}}, \quad m_2 = \frac{1}{1 + \frac{a_2}{\sigma_2/E}} \quad (4), (5)$$

ここで、 $\sigma_1$  および  $\sigma_2$  は表 4 に示す 2 つのオフセット耐力、 $a_1$  および  $a_2$  はこれら 2 つのオフセット耐力を算出する際のひずみである。なお、表 4 中の  $\sigma_{0.1}$  から  $\sigma_{0.6}$  は、0.1%耐力から 0.6%耐力を意味する。これら



(a)  $\sigma_{0.01}$  および  $\varepsilon_{0.01}$  を基準



(b)  $\sigma_{0.2}$  および  $\varepsilon_{0.2}$  を基準

図 5 無次元化した公称応力公称ひずみ関係

表 4 オフセット耐力の組合せ

$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.5}$
	$\sigma_{0.3}$		$\sigma_{0.4}$		$\sigma_{0.6}$
	$\sigma_{0.4}$		$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.5}$
	$\sigma_{0.5}$		$\sigma_{0.6}$		$\sigma_{0.6}$
	$\sigma_{0.6}$		$\sigma_{0.3}$		$\sigma_{0.6}$

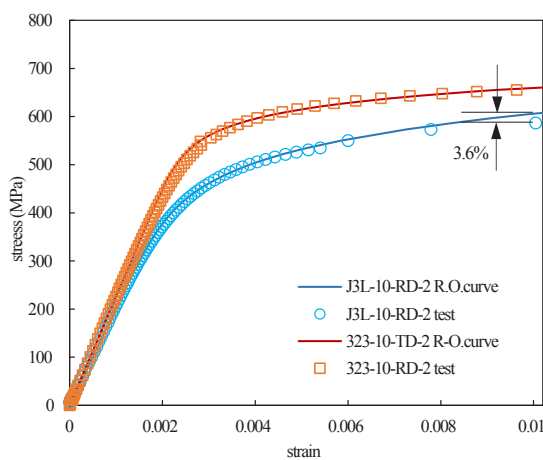
耐力の値は、表3および表5に示すようにオフセット法にて決定した。式(1)の Ramberg-Osgood 曲線の精度は、ステンレス鋼の応力ひずみ関係における非線形性が強くなる  $\sigma_{0.01}$  から  $\sigma_{0.2}$  の範囲、ひずみ 1%, 3%, 5%および10%の4点で検証する。また、 $\sigma_{0.01}$  から  $\sigma_{0.2}$  の範囲では、0.01%耐力点を始点とし、ひずみ 0.0005 ごとに引張試験で得られた応力と式(1)による

Ramberg-Osgood 曲線の比較により精度を検証する。なお、ひずみが数十%となる大ひずみ領域では、試験片断面が減少するため、真応力真ひずみ関係で表現する必要があるが、本研究では最大 10%ひずみまでを公称応力公称ひずみ関係による Ramberg-Osgood 曲線を用いることとする。

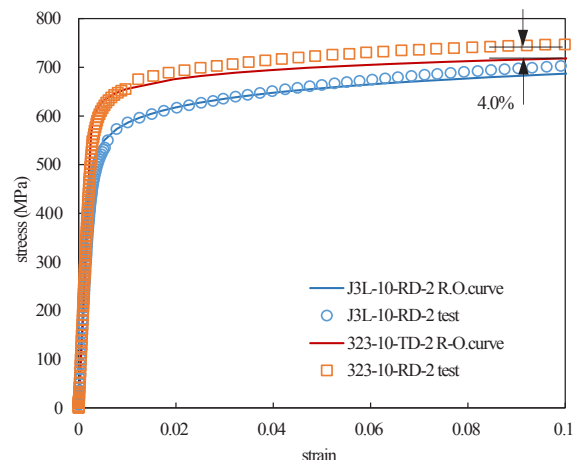
図6は、J3L-10-RD-2 および 323-10-TD-2 の引張試験

表5 対象とした二相系ステンレス鋼のオフセット耐力

試験片名	0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$ (MPa)	0.3%耐力 $\sigma_{0.3}$ (MPa)	0.4%耐力 $\sigma_{0.4}$ (MPa)	0.5%耐力 $\sigma_{0.5}$ (MPa)	0.6%耐力 $\sigma_{0.6}$ (MPa)	試験片名	0.1%耐力 $\sigma_{0.1}$ (MPa)	0.3%耐力 $\sigma_{0.3}$ (MPa)	0.4%耐力 $\sigma_{0.4}$ (MPa)	0.5%耐力 $\sigma_{0.5}$ (MPa)	0.6%耐力 $\sigma_{0.6}$ (MPa)
J3L-10-RD-1	482	541	561	573	583	323-10-RD-1	514	575	586	597	607
J3L-10-RD-2	480	535	560	573	580	323-10-RD-2	518	572	589	594	604
J3L-10-RD-3	477	533	565	569	576	323-10-RD-3	511	573	584	594	603
AVE	480	536	562	572	579	AVE	514	573	586	595	605
J3L-10-TD-1	524	608	624	639	643	323-10-TD-1	585	630	641	650	661
J3L-10-TD-2	521	605	628	632	638	323-10-TD-2	584	627	638	648	652
J3L-10-TD-3	526	603	624	630	636	323-10-TD-3	573	626	637	647	651
AVE	524	605	625	633	639	AVE	581	628	639	648	655
J3L-20-RD-1	458	527	543	556	565	323-20-RD-1	528	575	581	592	597
J3L-20-RD-2	450	531	546	560	568	323-20-RD-2	523	577	583	594	599
J3L-20-RD-3	454	542	550	563	568	AVE	525	576	582	593	598
AVE	454	533	546	560	567	323-20-TD-1	568	615	620	631	636
J3L-20-TD-1	490	580	598	606	615	323-20-TD-2	572	613	624	630	634
J3L-20-TD-2	485	582	592	606	610	323-30-TD-3	567	611	622	627	632
J3L-20-TD-3	481	579	590	602	609	AVE	569	613	622	629	634
AVE	485	580	593	605	611	821-10-RD-1	454	505	517	528	533
J4L-10-RD-1	533	595	612	618	629	821-10-RD-2	450	503	514	525	535
J4L-10-RD-2	541	595	612	618	629	821-10-RD-3	448	501	516	525	534
J4L-10-RD-3	540	596	612	618	627	AVE	451	503	516	526	534
AVE	538	595	612	618	628	821-10-TD-1	513	555	565	574	579
J4L-10-TD-1	578	662	674	685	695	821-10-TD-2	516	553	563	573	577
J4L-10-TD-2	589	665	677	688	698	821-10-TD-3	511	551	561	570	575
J4L-10-TD-3	587	666	677	688	697	AVE	513	553	563	572	577
AVE	584	664	676	687	697	821-20-RD-1	468	509	521	532	537
J4L-20-RD-1	464	553	574	587	602	821-20-RD-2	465	508	520	526	537
J4L-20-RD-2	472	553	573	586	592	821-20-RD-3	465	509	521	531	536
J4L-20-RD-3	470	553	572	584	596	AVE	466	508	521	530	537
AVE	469	553	573	586	597	821-20-TD-1	519	554	561	565	580
J4L-20-TD-1	520	604	636	642	649	821-20-TD-2	511	563	571	580	583
J4L-20-TD-2	526	599	631	648	652	821-20-TD-3	514	553	559	571	581
J4L-20-TD-3	519	607	637	642	649	AVE	515	556	564	572	581
AVE	521	604	634	644	650						



(a) ひずみ 1%までの範囲



(b) ひずみ 10%までの範囲

図6 Ramberg-Osgood 曲線を用いた公称応力公称ひずみ関係

表6 引張試験結果に対する Ramberg-Osgood 曲線の精度

試験片名	ひずみ1%までの範囲			ひずみ1%から10%の範囲			試験片名	ひずみ1%までの範囲			ひずみ1%から10%の範囲		
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	誤差(%)	$\sigma_1$	$\sigma_2$	誤差(%)		$\sigma_1$	$\sigma_2$	誤差(%)	$\sigma_1$	$\sigma_2$	誤差(%)
J3L-10-RD-1	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.5}$	2.6	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{0.3}$	2.2	323-10-RD-1	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.4}$	2.0	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	2.1
J3L-10-RD-2	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.2}$	3.0	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	2.4	323-10-RD-1	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	2.8	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.6}$	1.1
J3L-10-RD-3	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.6}$	1.7	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	0.9	323-10-RD-3	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.3}$	3.7	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	1.2 (8%)
J3L-10-TD-1	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.3}$	4.0	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.6}$	2.6	323-10-TD-1	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	2.7	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	1.9 (7%)
J3L-10-TD-2	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.3}$	4.7	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	2.4	323-10-TD-2	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.2}$	3.6	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	4.0
J3L-10-TD-3	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.4}$	4.5	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	1.8	323-10-TD-3	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.3}$	3.7	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	3.5 (9%)
J3L-20-RD-1	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.4}$	2.4	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	3.9	323-20-RD-1	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{0.3}$	2.3	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.5}$	0.6
J3L-20-RD-2	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.4}$	2.5	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	1.6	323-20-RD-2	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.5}$	2.7	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.6}$	0.5
J3L-20-RD-3	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.5}$	2.4	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.6}$	1.6	323-20-TD-1	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.5}$	4.0	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.6}$	0.2
J3L-20-TD-1	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.6}$	5.1	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.5}$	2.1	323-20-TD-2	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	4.7	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.6}$	0.6
J3L-20-TD-2	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.6}$	5.1	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.6}$	2.3	323-20-TD-3	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.2}$	4.5	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{0.5}$	0.2
J3L-20-TD-3	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.4}$	4.1	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	1.4	821-10-RD-1	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.6}$	2.4	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.6}$	0.5
J4L-10-RD-1	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.5}$	4.2	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.6}$	0.7	821-10-RD-2	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	2.4	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	0.3
J4L-10-RD-2	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	2.5	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.6}$	0.6	821-10-RD-3	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.2}$	4.2	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.5}$	1.2
J4L-10-RD-3	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	4.8	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.5}$	0.5	821-10-TD-1	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.6}$	3.8	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	0.6
J4L-10-TD-1	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.4}$	3.2	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	0.7	821-10-TD-2	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	3.9	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	0.0
J4L-10-TD-2	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.3}$	3.7	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	0.7	821-10-TD-3	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.5}$	3.7	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.6}$	0.2
J4L-10-TD-3	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.4}$	4.7	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	0.6	821-20-RD-1	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.5}$	2.3	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{0.4}$	0.4
J4L-20-RD-1	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.4}$	3.3	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.5}$	7.0 (6%)	821-20-RD-2	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	5.0	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{0.4}$	0.0
J4L-20-RD-2	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.3}$	3.3	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.6}$	1.9	821-20-RD-3	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.2}$	4.3	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.6}$	0.8
J4L-20-RD-3	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.3}$	2.8	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.5}$	5.1 (8%)	821-20-TD-1	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.6}$	4.3	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.3}$	0.2
J4L-20-TD-1	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.3}$	4.1	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	1.9	821-20-TD-2	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.2}$	4.2	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.4}$	1.5
J4L-20-TD-2	$\sigma_{0.3}$	$\sigma_{0.5}$	2.9	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	8.4	821-20-TD-3	$\sigma_{0.4}$	$\sigma_{0.6}$	2.8	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.4}$	1.6
J4L-20-TD-3	$\sigma_{0.1}$	$\sigma_{0.3}$	3.9	$\sigma_{0.5}$	$\sigma_{0.6}$	2.3							

験結果を、式(1)による Ramberg-Osgood 曲線で表現した応力ひずみ関係を示している。同図(a)より、 $\sigma_1=\sigma_{0.1}$ 、 $\sigma_2=\sigma_{0.2}$ の組合せを用いた Ramberg-Osgood 曲線は、非線形性が強くなる 0.01%耐力から 0.2%耐力点の範囲およびひずみ 1%までの試験結果を最大誤差約 3.6%で再現できることがわかる。また、紙面の都合上割愛するその他の鋼種についても、 $\sigma_1=\sigma_{0.1}$ 、 $\sigma_2=\sigma_{0.2}$ の組合せを用いた Ramberg-Osgood 曲線は、ひずみ 1%までの試験結果を最大誤差 18.6%で再現できることを確認した。つぎに、同図(b)より、 $\sigma_1=\sigma_{0.5}$ 、 $\sigma_2=\sigma_{0.6}$ の組合せを用いた Ramberg-Osgood 曲線は、ひずみ 10%までの範囲について、試験結果を過大評価することなく、最大誤差 4.0%で再現できることがわかる。

表 6 は、3 章で示した二相系ステンレス鋼の引張試験結果に対する Ramberg-Osgood 曲線の精度を検証した結果をまとめている。同表は、0.01%耐力点から 0.2%耐力点の範囲を含むひずみ 1%までの範囲およびひずみ 1%から 10%の範囲において、実験結果と Ramberg-Osgood 曲線との差が最も小さくなるオフセット耐力の組合せとその際の最大誤差を示している。なお、同表中のひずみ 1%から 10%の範囲について、誤差にある括弧は、Ramberg-Osgood 曲線でひずみ 10%までを再現できなかったため、括弧内のひ

ずみの範囲での精度を意味する。同表より、適切なオフセット耐力の組合せを用いた Ramberg-Osgood 曲線は、ひずみ 1%までの範囲およびひずみ 1%から 10%の範囲において、試験結果との誤差を最大平均 3.5%以下および 1.7%以下で再現できることがわかる。本研究では、公称応力公称ひずみ関係を Ramberg-Osgood 曲線で再現したが、真応力真ひずみ関係についても本研究結果と同様に、Ramberg-Osgood 曲線が実験結果を再現できることを確かめた。

## 5. おわりに

本研究は、二相系ステンレス鋼の材料特性およびこれら応力ひずみ関係への Ramberg-Osgood 曲線の適用性を検証した。本研究で得られた成果はつぎの通りである。

- (1) 対象とした二相系ステンレス鋼の材料強度は、圧延直角方向の結果が圧延方向の結果に比べて 7%程度大きくなる。
- (2) 0.01%耐力で無次元化した公称応力公称ひずみ関係は、0.2%耐力で無次元化した公称応力公称ひずみ関係に比べ、リー二相鋼の結果が汎用二相鋼に比べて応力比が大きくなる。
- (3) 0.1%耐力および 0.2%耐力を用いた Ramberg-Osgood 曲線は、ひずみ 1%までの範囲を最大誤

- 差約 18.6%で引張試験結果を再現できる。
- (4) 2 つのオフセット耐力を適切に選定した Ramberg-Osgood 曲線は、ひずみ 1%までの範囲およびひずみ 1%から 10%の範囲について最大平均 3.5%以下および 1.7%以下で引張試験結果を再現できる。

#### 謝辞

本研究は公益社団法人ユニオンツール育英奨学金平成 27 年度研究助成により実施したものである。また、本研究で実施した引張試験に用いた試験片は日本鋼構造協会より提供いただいたものである。ここに記して、謝意を表する。

#### 【参考文献】

- 1) 日本鋼構造協会ステンレス鋼の土木構造物への適用検討小委員会: 土木構造技術者のためのステンレス鋼ガイドブック, 2009.
- 2) 及川雄介, 拓殖信二, 江目文則, 本村洋, 井上裕慈: 構造用素材として優れたコストパフォーマンスを持つ省合金型二相ステンレス鋼 (NSSC®2120)の開発, まてりあ, Vol.55(2016), No.2, pp.70-72, 2016.
- 3) 及川雄介, 拓殖信二, 梶村治彦, 井上裕慈: 省合金型二相ステンレス鋼溶接熱影響部の特性, 溶接学会誌, Vol.82(2013), No.6, pp.435-438, 2015.
- 4) 日本工業規格協会: JIS G4304 熱間圧延ステンレス鋼板および鋼帯(追補 1), 日本工業規格協会, 2015.
- 5) 佐藤信輔, 宮寄靖大, 奈良敬: 高強度ステンレス鋼への Ramberg-Osgood 曲線の適用性の検証, 平成 27 年度土木学会全国大会第 70 回年次学術講演会, I-562, CD-ROM, 2015.
- 6) 佐藤信輔, 宮寄靖大: 引張試験による二相系ステンレス鋼の材料特性, 平成 28 年度土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会, I-305, CD-ROM, 2016.
- 7) 宮寄靖大, 奈良敬: ステンレス鋼の弾性係数の変化および Ramberg-Osgood 曲線の適用性について, 平成 23 年度土木学会全国大会第 66 回年次学術講演会, I-646, CD-ROM, 2011.
- 8) 日本工業規格協会: JIS Z2241 金属材料引張試験方法, 日本工業規格協会, 2011.
- 9) 三好崇夫, 宮寄靖大, 奈良敬: 二相系ステンレス鋼の極限圧縮強度特性, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.80-91, 2009.
- 10) 宮寄靖大: ステンレス鋼板の圧縮強度特性と終局強度評価法, 大阪大学, 学位論文, 2010.
- 11) Walter Ramberg, William R. Osgood: Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, National Advisory Committee for Aeronautics, No.902, 1943.